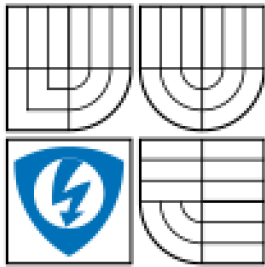


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS**

## **FOTOLUMINISCENČNÍ DIAGNOSTICKÁ METODA S TRANSMISNÍM OSVĚTLENÍM**

**PHOTOLUMINESCENCE DIAGNOSTIC METHOD WITH TRANSMISSION  
ILLUMINATION**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

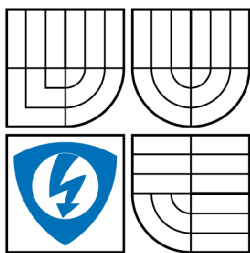
**Bc. MARTIN KAFKA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, PhD.**

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Telekomunikační a informační technika**

**Student:** Bc. Martin Kafka

**ID:** 83667

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Fotoluminiscenční diagnostická metoda s transmisním osvětlením**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami pro detekci defektů ve funkční struktuře solárních křemíkových článků. V laboratoři diagnostických metod solárních článků ÚETE a ve spolupráci s firmou Solratec s.r.o. si proměřte solární články metodou elektroluminiscence, fotoluminiscence a luminiscence mikroplazmy. Metodu fotoluminiscence inovujte o možnost použití zadního budícího zdroje osvětlení. Inovovanou metodu srovnajte se stávajícími metodami.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Murtinger K., Beranovský J., Fotovoltaika - elektřina ze slunce, ERA, 2007
- [2] Hegedus L., Handbook of photovoltaic science and engineering, Wiley, 2003

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 26.5.2009

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

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Anotace**

Cílem této diplomové práce je inovace měřicího pracoviště fotoluminiscence pro měření defektů solárních článků pomocí transmisního osvětlení s využitím stávajících metod pro měření defektů ve funkční struktuře solárních křemíkových článků.

První část je zaměřena na objasnění historického využití sluneční energie, dále jakým způsobem dochází k tvorbě energie pomocí slunečního záření, definování funkčních vlastností křemíkových článků a použití různých typů solárních článků v praxi. Důležitým prvkem je analýza metod používaných k měření defektů solárních článků, které jsou využívány v laboratoři diagnostických metod Ústavu Elektrotechnologie Vysokého učení technického v Brně.

V druhé části se práce zabývá mechanickým návrhem experimentálního měřicího pracoviště fotoluminiscence pro rychlou detekci defektů, využívající zadní budící zdroj určený k detekci defektů pomocí transmisní metody osvětlení.

Na závěr jsou touto experimentální metodou za spolupráce s firmou SOLARTEC s.r.o. proměřeny tři typy článků, které jsou následně porovnány s výsledky stávajících měřících metod LBIC (Light Beam Induced Current), LBIV (Light Beam Induced Voltage), elektroluminiscence, fotoluminiscence a detekcí vad při záření mikroplazmy.

### **Klíčová slova:**

Transmisní osvětlení, solární článek, Slunce, fotovoltaický efekt, materiály solárních článků, křemík, defekty fotovoltaických článků, LBIC, LBIV, elektroluminiscence, fotoluminiscence, mikroplazma.

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is an innovation of photoluminescence measure research workplace for measurement of cells structure defects by method of transmissive illumination while employing the current methods of measurement of defect in the solar cells structure.

The first part deals with explanation of historical development of solar energy, of how we can reach production of electric power with contribution of solar radiation and defines usability of solar cells in practice. The thesis further analyses a practical application of measurement via laboratory diagnostic methods used by Department of Electrotechnology Brno University of Technology.

The second part is focused on mechanical design of experimental photoluminescence measure workspace used for quick diagnostic defects employing the rear arousing source for detection of defects with assistance of transmissive system of illumination.

Finally, with co-operation of SOLARTEC s.r.o. three types of solar cells are measured by this new method and compared with results of measurement via diagnostic methods of LBIV (Light Beam Induced Current), LBIC (Light Beam Induced Voltage), Electroluminescence, Photoluminescence, and detection defects by radiation of Microplasma.

### **Keywords:**

Transmission illumination, solar cell, sun, photovoltaic effect, materials of solar cells, silicon, defects of photovoltaic cells, LBIC, LBIV, Electroluminescence, Photoluminescence, Microplasma.

KAFKA, M. *Fotoluminiscenční diagnostická metoda s transmisním osvětlením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaňek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Fotoluminiscenční diagnostická metoda s transmisním osvětlením" 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 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 §152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

# Obsah

Úvod .....	9
<b>1 Slunce .....</b>	<b>10</b>
1.1 Historie využití sluneční energie.....	11
1.2 Využívání sluneční energie .....	12
<b>2 Fotovoltaický efekt.....</b>	<b>13</b>
2.1 Materiály použité k výrobě článků .....	13
2.2 Solární článek .....	15
2.3 V-A charakteristika solárního článku .....	16
2.4 Náhradní elektrické schéma solárního článku.....	18
2.5 Parametry solárního článku [9].....	18
<b>3 Defekty křemíkových fotovoltaických článků .....</b>	<b>21</b>
3.1 Detekce defektů pomocí metody LBIC.....	21
3.2 Detekce defektů pomocí metody LBIV .....	22
3.3 Detekce defektů pomocí elektroluminiscence .....	23
3.4 Detekce defektů pomocí záření mikroplazmy.....	24
3.5 Detekce defektů pomocí fotoluminiscence .....	25
3.6 Fotoluminiscence [12] .....	25
<b>4 Mechanický návrh měřicího pracoviště .....</b>	<b>28</b>
4.1 Úvod do problematiky .....	28
4.2 Popis schématu inovovaného měřicího pracoviště .....	31
4.2.1 Úprava stávajícího měřicího boxu .....	32
4.2.2 Vnitřní rozebíratelný měřicí box.....	33
4.2.3 Vrchní část rozebíratelného měřicího boxu s upraveným zrcadlem.....	33
4.2.4 Speciální osvětlovací box s mléčným sklem .....	35
4.2.5 Ventilační systém .....	36
4.2.6 Spínací programátor .....	37
<b>5 Zhodnocení výsledků měření současnými diagnostickými metodami .....</b>	<b>41</b>
<b>6 Inovovaná metoda fotoluminiscence s transmisním osvětlením.....</b>	<b>47</b>
6.1 Výsledky měření a problémy metody FTO .....	47
6.2 Řešení problematiky měření FTO .....	53
<b>Závěr.....</b>	<b>54</b>
<b>Abecední seznam použitých zkratk .....</b>	<b>56</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>57</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>58</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>60</b>



## Úvod

V dnešní době se zvyšuje poptávka po kvalitních solárních článcích pro nejrůznější účely a zajistit při výrobě co nejlepší parametry výkonnosti článků je primární záležitost dnešních firem zabývajících se touto výrobou. Proto je nutné hned při produkci dbát na co nejlepší detekci vadných nebo jiným způsobem výkonnostně ovlivněných článků. Tuto problematiku řeší nejrůznější detekční metody struktury solárních článků a právě jednu z těchto metod experimentálně řeší tento projekt.

Diplomová práce se nejdříve bude zabývat seznámením s metodami defektů ve funkční struktuře solárních křemíkových článků. Objasní se, jakým způsobem dochází k tvorbě energie pomocí slunečního záření a bude zde uvedena vhodnost použití solárních článků v praxi. Důležitým prvkem této práce bude v laboratoři diagnostických metod solárních článků ÚETE ve spolupráci s firmou Solartec změření 3 druhů solárních článků metodami LBIC (Light Beam Inducted Current), LBIV (Light Beam Inducted Voltage), pomocí Elektroluminiscence, Fotoluminiscence a detekcí vad při záření Mikroplazmy.

Stěžejní částí práce bude mechanická i elektrická inovace stávajícího pracoviště měření fotoluminiscence pro experimentální měření fotoluminiscenční diagnostickou metodou s transmisním osvětlením a v závěru porovnání změřených výsledků se stávajícími metodami měření defektů.

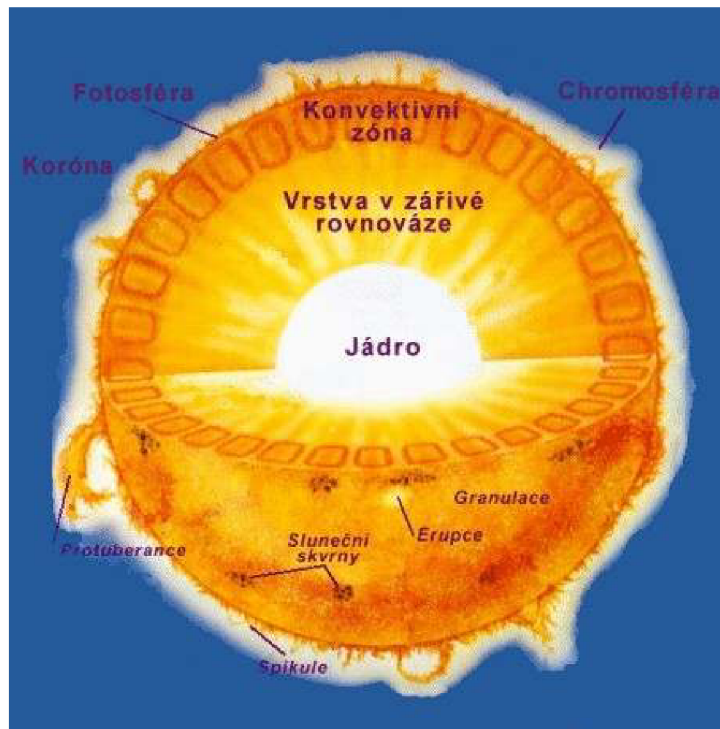
# 1 Slunce

Slunce je jednou ze sta miliard hvězd naší Galaxie. Nalézá se ve středu skupiny vesmírných objektů tvořících sluneční soustavu. Obíhá kolem něho devět planet. Nejbližší planetou je Merkur, dále pak Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun a Pluto. Vzdálenost Slunce od Země je 150 milionu km.

S průměrem 1 390 000 km a průměrnou hustotou  $1410 \text{ kg.m}^{-3}$  představuje Slunce samo 99,86 % veškeré hmoty sluneční soustavy. A přitom není, stejně jako ostatní hvězdy, ničím jiným než ohromnou koulí vodíku a helia, která se působením vlastní hmoty smršťuje. Povrchová teplota  $6000^\circ\text{C}$  při postupu ke středu, kde působí obrovské tlaky, stoupá až na 15 milionů  $^\circ\text{C}$ . Vysoká teplota nitra podmiňuje udržení jaderné reakce, téměř nevyčerpatelného zdroje energie, která se uvolňuje spalováním vodíku za vzniku helia.

Pouze část termojaderné energie se dostane do povrchové vrstvy Slunce, fotosféry, kde tlak klesá až na jednu desetinu zemského atmosférického tlaku. Nad touto vrstvou se rozkládají další, méně husté vrstvy, viditelné jen při zatmění: chromosféra a koróna (obr. 1.1). Při postupu všemi těmito vrstvami prochází energie četnými proměnami: energie vyzařovaná do kosmického prostoru se šíří v podobě elektromagnetických vln, infračervených vln, viditelného světla, ultrafialového záření a paprsků gama. Slunce je zmítáno neustálými erupcemi, vyšlehávají z něj nepřetržité ohnivé jazyky, protuberance a místy se na jeho povrchu tvoří temnější plochy (teplota asi  $3000^\circ\text{C}$ ), sluneční skvrny typické pro období zvýšené sluneční aktivity (přibližně jednou za 11. let). Slunce vyvrhuje ohromné množství částic ze sluneční koróny, tím vzniká tzv. sluneční vítr jehož teplota je přibližně  $1\,000\,000^\circ\text{C}$  a pohybuje se rychlostí  $300\text{-}700 \text{ km.s}^{-1}$ . Zvýšená aktivita vyvolává na Zemi magnetické bouře a polární záři.

Slunce existuje 5 miliard let a astronomové se domnívají, že planety v jeho sousedství vznikali v téže době kondenzací kosmického prachu. [1]



Obr. 1.1: Průřez jednotlivými vrstvami Slunce [2]

## 1.1 Historie využití sluneční energie

O využití sluneční energie se pokoušeli lidé již od pradávna, ale k opravdovému plošnému používání došlo až ve 20. století. [3]

**7. st. př. n. l.** – v Mezopotámii se začíná k rozdělení ohně používat soustředěného slunečního paprsku skrze čočky.

**4. st. př. n. l.** – v Řecku se začínají používat tzv. sluneční hodiny.

**1. st. n. l.** – dějepisec Plinius, původem z Itálie, buduje ze sklenic sluneční dům (dnešní obdoba skleníku), čímž dosahuje v interiéru stabilní teploty.

**14. st. n. l.** – Indiáni obývali svá stavení z cihel a kamení, jejichž přední části byly orientovány směrem k jihu, kam dopadalo zimní slunce.

**1556** – Georg Fabricius z Německa díky svým pokusům s chloridem sodným zjistil, že lze vyvolat chemickou reakci pomocí slunečních paprsků.

**18. století** – Francouz Antoine Lavoisier postavil sluneční pec pro tavení platiny

**1727** – první vysvětlení rozkladu slunečního světla Isaacem Newtonem

**1827** – V Chile bylo vyvinuto zařízení, které pomocí sluneční energie získávalo pitnou vodu ze slané vody. Denní produkce se pohybovala okolo 23 tun pitné vody.

- 1884** – August Mouchot sestrojil první parní stroj využívající solární energii
- 1908** – vyvinut první solární kolektor s možností umístění na střechy domů společností Carnegie Steel.
- 1941** – na Floridě jsou nainstalovány první solární ohřivače vody.
- 1950** – první kancelářská budova využívající solární energii k vyhřívání navrhnutá architektem Frankem Bridgersem.
- 1958** – proniknutí solárních panelů do kosmického průmyslu.

## **1.2 Využívání sluneční energie**

Sluneční energie se řadí k obnovitelným zdrojům energie, které se využívají v nejrůznějších částech lidské činnosti. Na naši Zemi dopadne díky slunečním paprskům přibližně 1kW energie na m<sup>2</sup> (Solární konstanta), což v porovnání s plochou Země odpovídá dvacetisíckrát více energie, než lidstvo dokáže spotřebovat. Jen nepatrná část solární energie se přemění díky solárním článkům na energii elektrickou. Solární články se používají v mnoha oblastech a to od solárních kalkulaček přes topící a napájecí systémy až po energetické zabezpečení horských chat v rozsahu desítek kilowat. Novinkou je používání u tzv. hybridních motorů či přímo automobilů na solární pohon a také u prototypu letadla. Cesty do Vesmíru raketoplány a satelitní družice by se také neobešly bez solárních článků, navíc na ně mimo zemský povrch dopadá až 10x více světla. V domácnostech se používá solární energie k vytápění domů či k ohřevu vody, například střecha domu v severských oblastech může získat až 10x více energie, než se spotřebuje na vytápění. [3]

## 2 Fotovoltaický efekt

Solární články fungují na principu fotovoltaického (fotoelektrického) efektu, kde dopadající světlo se přemění na elektrickou energii. První pokusy učinil roku 1839 francouzský fyzik Edmund Becquerel s dvěma kovovými elektrodami ponořenými ve vodivé lázni. Zjistil, že se zvyšujícím zářením vzrůstá na elektrodách napětí. Po 38 letech roku 1877 byl vědci W.G. Adamsem a R.E. Dayem vyroben funkční fotovoltaický článek na bázi selenu.

Matematicky a fyzikálně byl tento efekt popsán Albertem Einsteinem r. 1905 a později v roce 1922 za tento důkaz získal Nobelovu cenu za fyziku. Einstein zjistil, že fotovoltaický efekt je zvláštní jev, který se projevuje v polovodičích. Pokud na povrch polovodičového materiálu dopadnou fotony, dokáží pak přenést svou energii na elektrony umístěné v materiálu a způsobí jejich pohyb z orbit. Jestliže jsou v polovodiči vhodné koncentrace nečistot, vytvoří se el. náboj díky přitahování elektronů k jednomu povrchu.

V roce 1953 byl otestován fotovoltaický efekt na bázi monokrystalického křemíku. Jednalo se o křemíkovou destičku dotovanou arsenem (As) o velikosti  $2\text{cm}^2$ , kde byl vytvořen přechod PN pomocí boru (B). Tato soustava se pyšnila účinností okolo 6%.  
[1]

### 2.1 Materiály použité k výrobě článků

#### Křemík

Jak už bylo zmiňováno, křemík je v současnosti nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků. Při výrobě článků je nutné rozlišit tyto typy křemíku: **monokrystalický (obr. 2.1a) a amorfní (obr. 2.1b).**

**Monokrystalický křemík** – tento typ křemíku je v současnosti stále nejpoužívanější, z hlediska provozu se vyznačuje stabilním vysokým výkonem a poměrně dobrou účinností oproti amorfnímu křemíku. Solární článek s plochou  $100\text{cm}^2$  tohoto druhu může vytvářet proud až 4A. Nevýhoda tkví ve výrobě, protože je při ní nezbytně nutné spotřebovat velké množství čistého křemíku.

**Amorfní křemík** – tento typ byl vyvinut s ohledem na snížení výrobních nákladů kvůli rostoucí nedostupnosti křemíkového materiálu. Článek má 1000 krát tenčí absorpční polovodičovou vrstvu. Vhodnost použití je u zařízení s menšími výkony. Vyznačuje se stabilní účinností i při zhoršených světelných podmínkách.

### **Arsenid galia**

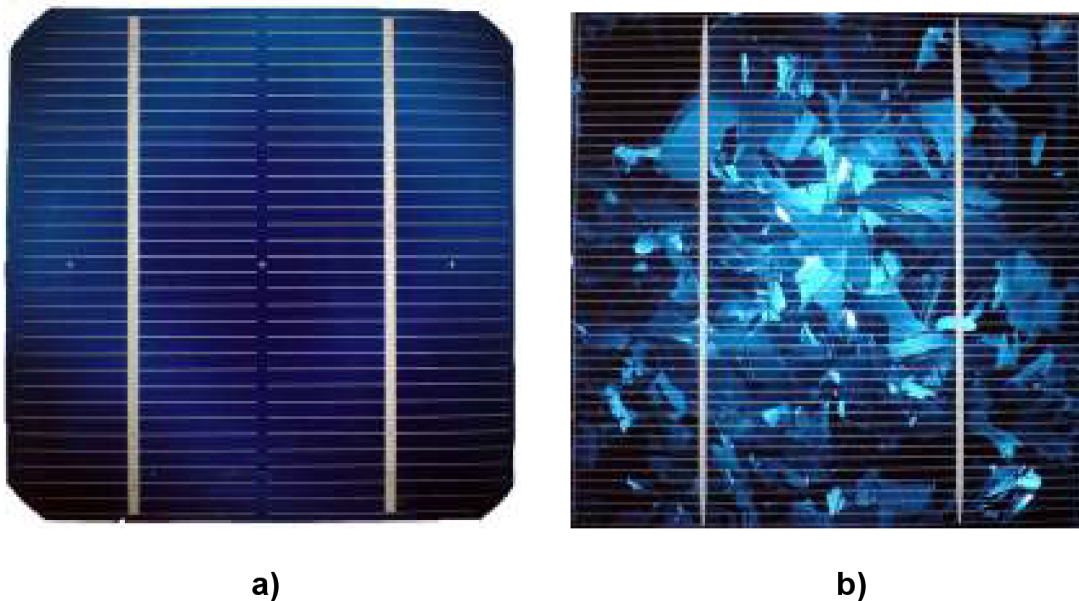
Články tohoto typu jsou efektivnější oproti křemíkovým článkům, jsou použitelné i ve špatných podmínkách a vyznačují se až o 20% vyšší účinností. Na druhou stranu jsou podstatně dražší a ne příliš dostupné.

### **Sulfid kademnatý**

Dnes se již tento typ článku téměř nepoužívá. Protože článek nebyl elektricky příliš stabilní, mohla se jím napájet jen nízkopříkonová zařízení. Mezi výhody patří nízká hmotnost a použití v zařízeních na vesmírných projektech NASA.

### **Polymery**

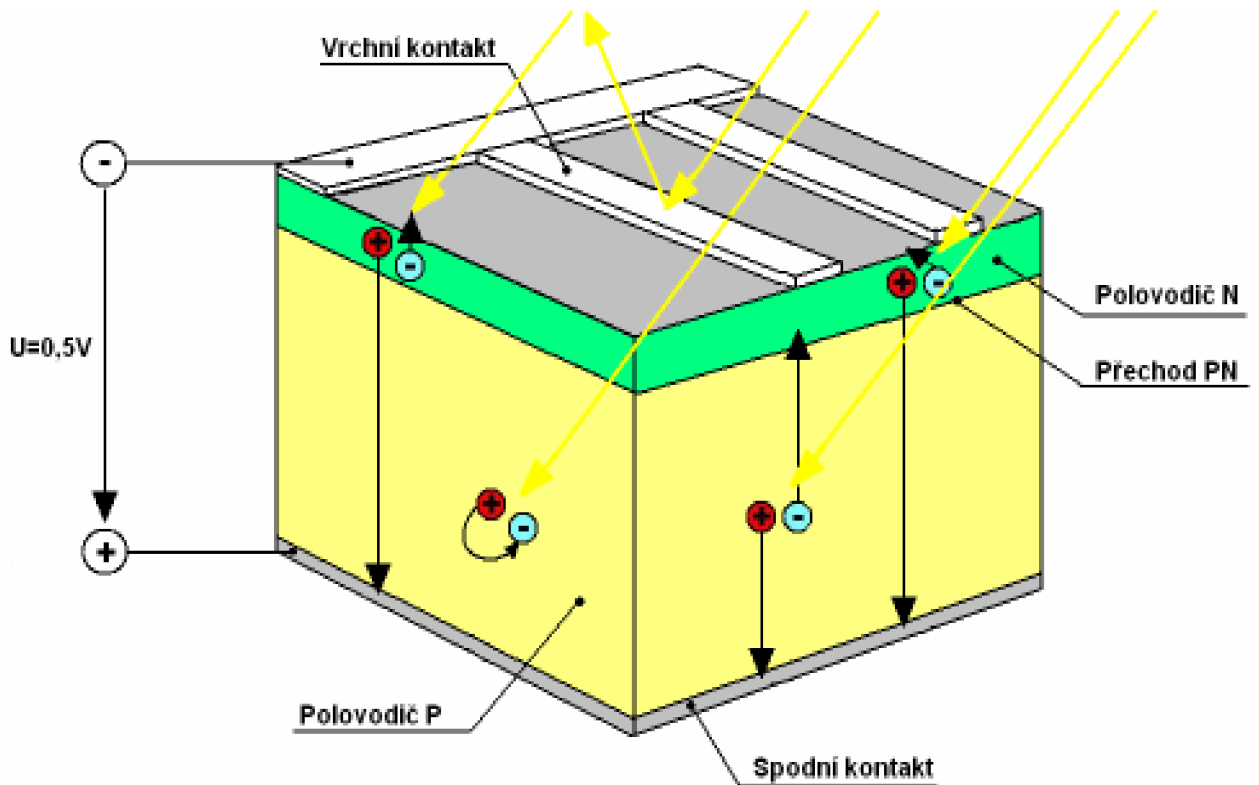
V současné době je tento materiál novinka. Výhodou těchto článků oproti svým konkurentům jsou výrobní náklady, které jsou mnohonásobně nižší než například u křemíkových článků. Polymerové články jsou také velice lehké a ohebné. Díky této vlastnosti se mohou používat na široké škále objektů jako jsou například domy, automobily nebo dokonce v budoucnu i na tkaninách a látkách. Nevýhoda je prozatím nízká účinnost, která se v laboratorních podmínkách pohybuje kolem 6,5 %. Ovšem při použití na velkých plochách a s přihlédnutím k nízkým výrobním nákladům a dalším výzkumům týkajících se zvýšení účinnosti, bude tento typ solárních článků v budoucnu plnohodnotnou náhradou křemíkových solárních článků.



**Obr. 2.1: a) Monokrystalický článek, b) Amorfní článek**

## **2.2 Solární článek**

Hlavní surovinou pro výrobu solárních článků je křemík, který je vyráběn z  $\text{SiO}_2$  (oxid křemičitý). V dnešní době se křemík nejen těží, ale také obnovuje z již použitého křemíkového materiálu (použité elektronické součástky). Materiál se nejdříve přetaví, za vysokých teplot se zbaví nečistot a pak se použije k výrobě solárních článků nebo jiných součástek. Čisté krystaly se rozřežou na pláty o tloušťce 300  $\mu\text{m}$ . Samotný solární článek je tvořen dvěma vrstvami krystalického křemíku. Jedna vrstva je sycena obvykle fosforem (P), protože má o jeden elektron více než křemík (polovodič N) a díky tomu tvoří kladný náboj. Druhá vrstva je tvořena prvkem, který obsahuje o jeden elektron méně (polovodič P) a tvoří tím tedy záporný náboj. Většinou je realizován pomocí stříbrné (Ag) mřížky s příměsí hliníku (Al). Mezi těmito vrstvami se díky rozdílnému počtu elektronů vytvoří přechod P-N. Pokud na vrchní vrstvu N dopadnou fotony, uvolní se elektrony, které ale nemohou přejít do vrstvy N, protože jsou izolovány elektrickou bariérou a hromadí se v horní vrstvě. Pokud připojíme elektrický obvod na vývody, elektrony z vrchní vrstvy budou procházet do spodní vrstvy, což je dáno vlastností PN přechodu. Elektrony z vrstvy P obsazují volná místa elektronů vrstvy N a dochází k vedení. Funkční struktura solárního článku je zobrazena na obr. 2.2. [9]



**Obr. 2.2: Funkční struktura solárního článku**

Použitím jednoho článku je možné generovat velice nízké napětí zhruba 0,6V. Pro zvýšení výkonu se články zapojují buď paralelně nebo sériově a tvoří tak solární moduly. Vyšší napětí se získá zapojením článků do série a vyšší proud paralelním zapojením. Solární články jsou velice tenké a křehké, proto jsou chráněny několika vrstvami (většinou dvěma). Nejdříve je zde vrstva průhledného tvrzeného skla a potom speciální fólie. Křemíkové solární články se nejčastěji umísťují do panelů obdélníkového tvaru širokých několik centimetrů.[9]

### 2.3 V-A charakteristika solárního článku

V-A charakteristika ideálního solárního článku bez vlivu paralelního a sériového odporu je definována vztahem [4]:

$$I = I_S \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT} - 1\right) \right] - eg(L_n - L_p)S \quad (1)$$

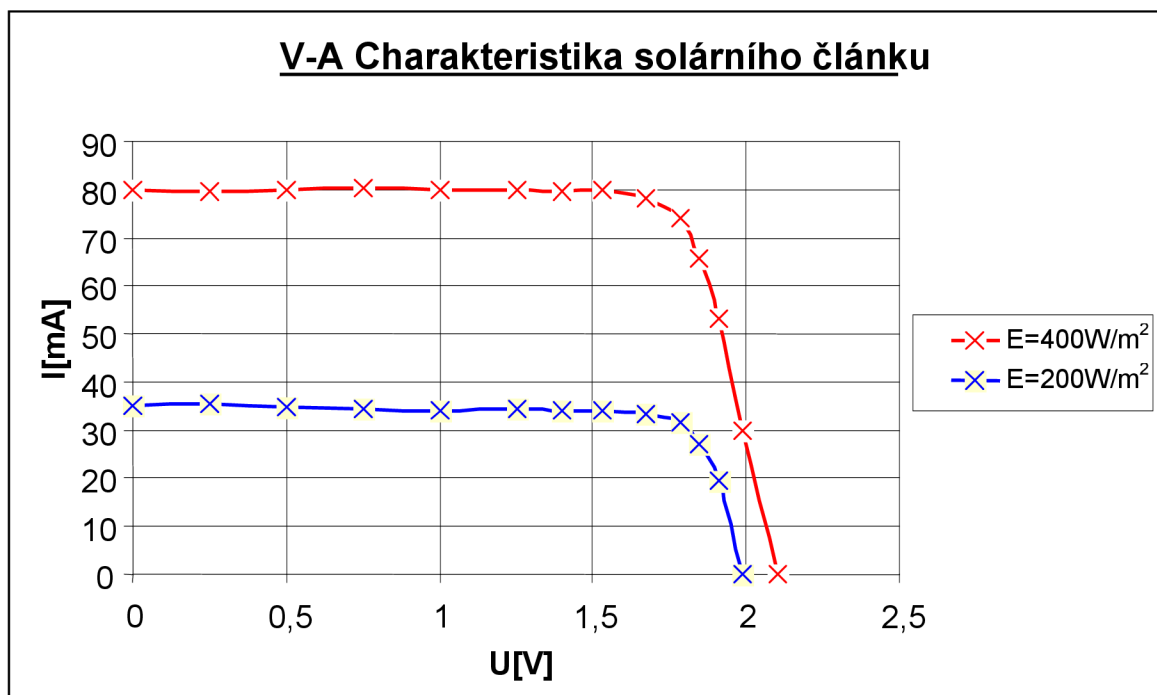


Ve vztahu  $I$  znázorňuje proud protékající fotočlánkem,  $I_s$  odpovídá proudu procházejícím PN přechodem,  $U$  je napětí naměřené na svorkách,  $k$  je boltzmanova konstanta,  $e$  je hodnota elementárního náboje,  $T$  je teplota PN přechodu,  $g$  je rychlost generace závisící na intenzitě světla,  $L_n$  a  $L_p$  znázorňují difúzní délky elektron/díra a  $S$  definuje plochu článku. Při chodu na krátko ( $U=0$ ) je velikost proudu definována vztahem:

$$I = I_f = -eg(L_n + L_p)S \quad (2)$$

Při chodu na prázdko ( $I=0$ ) je velikost napětí  $U_0$  definována vztahem:

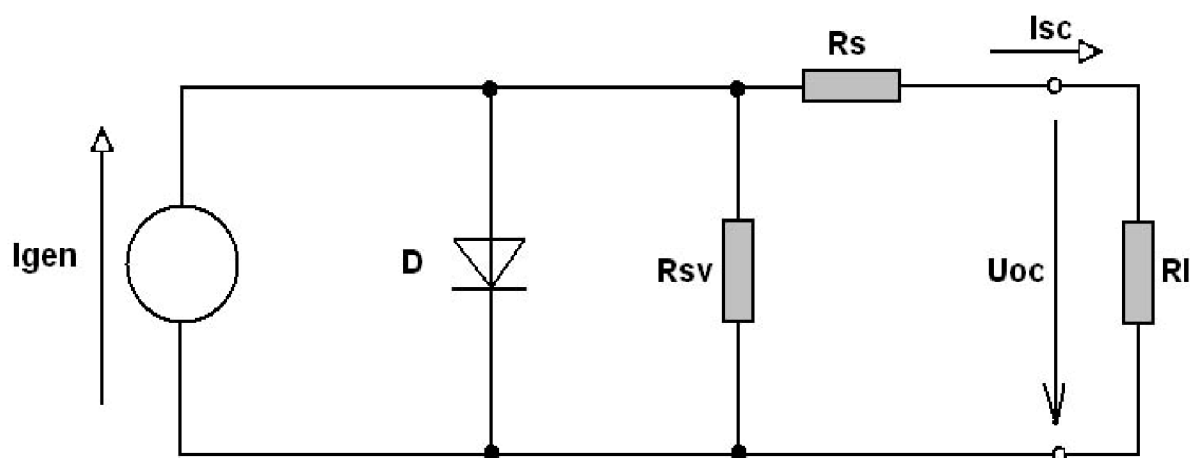
$$U_0 = \frac{k.T}{e} \cdot \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_s}\right) \quad (3)$$



**Obr. 2.3: V-A charakteristika solárního článku**

## 2.4 Náhradní elektrické schéma solárního článku

Na obr. 2.4. je znázorněn náhradní elektrické schéma solárního článku. Čím vyšší bude intenzita dopadajícího záření, tím větší se pak bude generovat proud  $I_{gen}$ , který zajistí co nejvyšší rekombinaci a dojde k růstu výstupního výkonu. Maximální výkon je dán minimálním sériovým odporem  $R_s$  ( $R_s$  reprezentuje odpor kontaktů a přívodů na PN přechodu, minimalizuje elektrické ztráty) a co největším svodovým odporem  $R_{sv}$ . Odpor  $R_l$  znázorňuje zátěž solárního článku.



Obr. 2.4: Náhradní elektrické schéma solárního článku [5]

## 2.5 Parametry solárního článku [9]

Na konci výrobního procesu se solární článek musí proměřit a zařadit do určitých specifických skupin podle parametrů. Sledované elektrické parametry se proměřují při  $25^\circ\text{C}$  a intenzitě světla  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Tyto parametry dělíme na:

- Parametr  $I_{450}$
- Zkratový proud
- Napětí na prázdno
- Výkon
- Účinnost
- Faktor plnění
- Paralelní odpor článku
- Sériový odpor článku

## Parametr $I_{450}$

Jedním z nejzákladnějších parametrů používaných výrobcí pro třídění článků do výkonostních tříd je parametr zvaný  $I_{450}$ . Je to proud protékající solárním článkem, kdy napětí na článku odpovídá 450mV.

## Zkratový proud

Tento parametr se značí  $I_{sc}$  a je to proud, při kterém je napětí na solárním článku nulové. Pokud je odpor  $R_s$  nulový, můžeme říci, že proud  $I_{sc}$  je roven proudu  $I_{GEN}$ . Měření tohoto parametru se realizuje speciálním přístrojem.

## Napětí na prázdno

Dalším sledovaným parametrem je napětí na prázdno značené  $U_{oc}$ . Toto napětí je naměřeno na výstupních kontaktech článku, pokud zde není připojen žádný spotřebič odebírající elektrickou energii.

## Výkon

Parametrem výkonu  $P_M$  zjišťujeme, jak velké množství energie lze ze solárního článku odebírat. Pokud chceme optimálně využívat tento typ energie, je nutné se pohybovat na maximálním bodě výkonového spektra. Výkon  $P_M$  lze zapsat následujícím vztahem:

$$P_M = U_M \cdot I_M [W] \quad (4)$$

Kde  $I_M$  je maximální proud a  $U_M$  je maximální napětí naměřené při maximálním zatížení.

## Účinnost

Tento parametr udává velikost účinnosti (efektivity) solárního článku při přeměně světelné energie na energii elektrickou. V současné době se účinnost průmyslově vyráběných článků pohybuje v rozmezí 7-25% v závislosti na druhu článku. V případě laboratorních pokusů se může prokazatelně dosáhnout až o 20% vyšší účinnosti. [6],[7]

## Faktor plnění (Fill-Factor)

Faktor plnění, označován také jako Fill Factor se značí zkratkou **FF**. Jedná se o parametr znázorňující ideálnost článku. Čím je parametr **FF** vyšší, tím je solární článek hodnotnější. Pro křemíkové články jsou typické hodnoty 60-80%, výpočet **FF** je zřejmý ze vztahu (5).

$$FF = \frac{I_M \cdot U_M}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{P_M}{P_O} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

## Paralelní odpor článku

Jedná se o negativní parametr. Tento parazitní odpor **R<sub>sv</sub>** (svodový odpor) může být způsoben svodovým proudem článků nebo jinými defekty. Hodnota paralelního odporu pro ideální článek by se měla blížit k nekonečnu. Odpor je paralelně spojen s diodou, takže zde dochází k úbytku proudu. V běžném životě se hodnota tohoto odporu opomíjí.

## Sériový odpor článku

Hodnota sériového odporu pro ideální článek by se měla rovnat nule. Pokud se velikost sériového odporu zvýší, sníží se proud **I<sub>sc</sub>** a na odporu **R<sub>s</sub>** dojde ke vzniku napětí a tím se zvýší proud procházející diodou **D**. Výstupní napětí **U<sub>oc</sub>** zůstává stejné. Jestliže tato situace nastane, sníží se účinnost článku a dochází k neefektivnímu využívání solárního zařízení.

### 3 Defekty křemíkových fotovoltaických článků

Výroba solárních článků je složitý proces, při kterém může docházet k poruchám, ať už způsobeným lidským nebo mechanickým faktorem, které ve výsledku mohou snížit požadované parametry solárního článku. Tyto poruchy můžeme rozdělit do dvou skupin a to na procesní a materiálové defekty.

**Procesní defekty** - vznikají při výrobě a při dalším zpracovávání křemíkových solárních článků.

**Materiálové defekty** – vznikají při samotné výrobě křemíku, který se pak používá pro výrobu solárních článků [8].

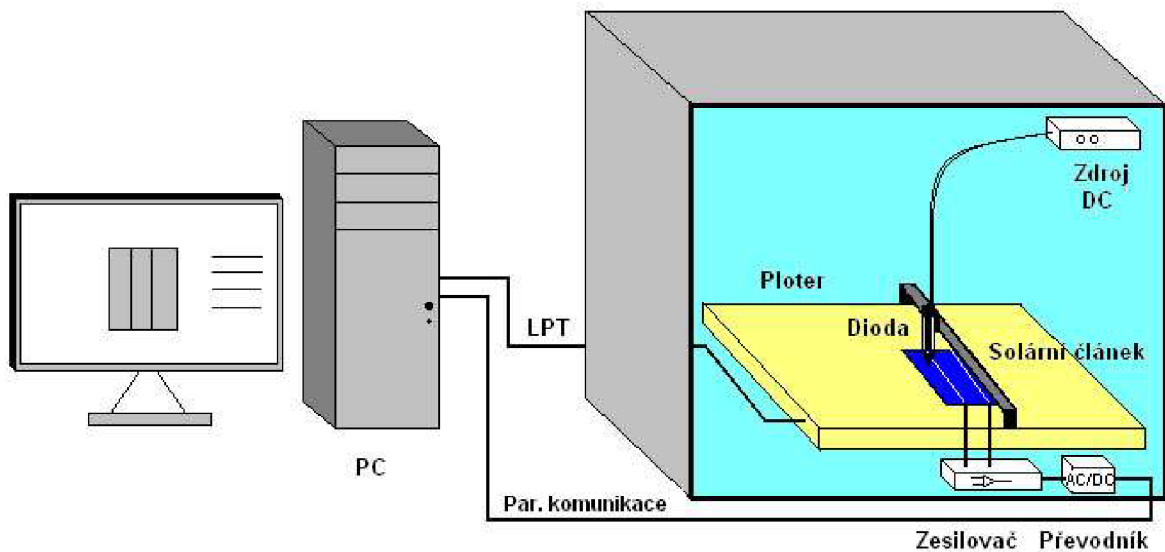
#### 3.1 Detekce defektů pomocí metody LBIC

LBIC (Light Beam Inducted Current) je poměrně pomalá metoda (měření může probíhat i několik hodin v závislosti na velikosti článku a míře přesnosti zvoleného měřicího kroku) sloužící ke zkoumání defektů solárního článku. Metoda využívá ke svému měření proudu na krátko  $I_{sc}$ . V těsné blízkosti nad solárním článkem se pohybuje svítící LED dioda, která je zaostřena do úzkého svazku paprsku. Po osvětlení článku v určitém bodě dostáváme díky generaci proudu určitou hodnotu proudu, která se zesílí a posílá přes sériovou komunikaci do PC. Paprsek se pohybuje v ose x po celé šířce měřeného článku a na konci se posune ve směru osy y o jeden krok dolů a opět se posouvá v opačném směru po ose x. Takto se postupně vykreslí celý článek. Přesnost měření se může kdykoliv měnit v průběhu měření změnou kroku (velikosti posuvu). Pro lepší diagnostiku lze požit více druhů LED diod s rozdílnou vlnovou délkou.

V počítači se tyto zkratové proudy podle svých hodnot převedou na odstíny šedé barvy tak, aby jejich velikost i poloha odpovídali měřenému solárnímu článku. Takto vznikne mapa, kde tmavá místa odpovídají vyšším hodnotám proudů a bílá místa, odpovídajícím místům, kde ke generaci proudu nedošlo. Výsledkem je tedy proudová mapa. Vzorec pro výpočet proudové odezvy  $I_{sc}$  viz. (6). Měřící pracoviště je zobrazeno na obr. 3.1.

$$I_{SC} = AJ_{FV} - I_{01} \left[ \exp\left(e \frac{R_S I}{kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(e \frac{R_S I}{2kT}\right) - 1 \right] - \frac{R_S I}{R_p} [A] \quad (6)$$

$I_{SC}$  – proud na krátko,  $A$  - osvětlená ploška článku,  $J_{FV}$  – hustota toku náboje generovaného článkem,  $I_{01}$  – difúzní proud PN přechodu v závěrném směru,  $e$  - hodnota elementárního náboje,  $R_S$  – sériový odpor,  $R_p$  – odpor přechodu,  $I$  – proud procházející odporem  $R_S$ ,  $k$  - boltzmanova konstanta,  $T$  - teplota PN přechodu,  $I_{02}$  – proud generačně rekombinační části PN přechodu v závěrném směru.



**Obr. 3.1: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou LBIC**

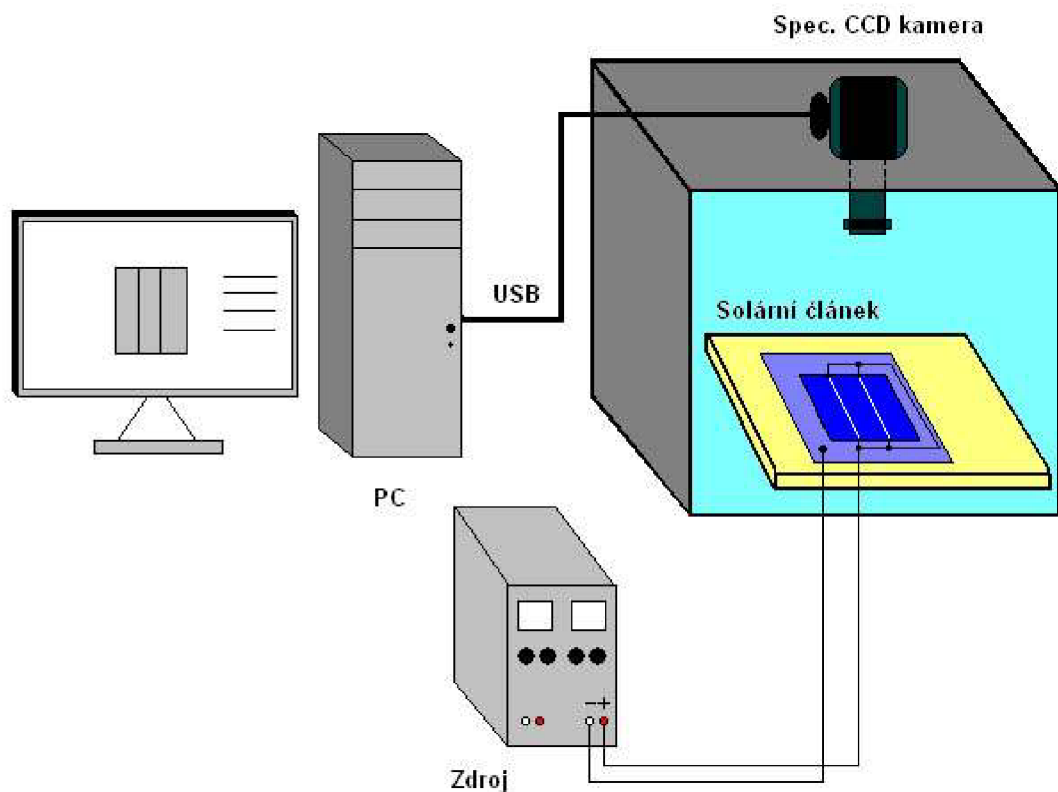
### 3.2 Detekce defektů pomocí metody LBIV

LBIV (Light Beam Inducted Voltages) je další měřicí metodou, která se velice podobá metodě LBIC, protože využívá stejných lokálních světelných mechanismů s různými vlnovými délkami. Rozdíl obou metod je v tom, že LBIC využívá k měření proudu na krátko  $I_{SC}$  a LBIV napětí naprázdno  $U_{OC}$ . Dioda opět osvětluje svým úzkým paprskem plochu článku a je posouvána po definovaných krocích v osách X-Y. Signál, odebíraný z článku, je filtrován pomocí pásmové propusti a před vstupem do PC je zesílen. Výsledný obraz je napěťová mapa. Vzorec pro výpočet napěťové odezvy  $U_{OC}$  viz. (7). Měřicí pracoviště je stejné jako u metody LBIC viz. obr. 3.1.

$$U_{oc} = \frac{2kT}{e} \ln \left( \frac{-I_{02} + \sqrt{I_{02}^2 + 4I_{01}(I_{02} + I_{01} + AJ_{FV})}}{2I_{01}} \right) [V] \quad (7)$$

### 3.3 Detekce defektů pomocí elektroluminiscence

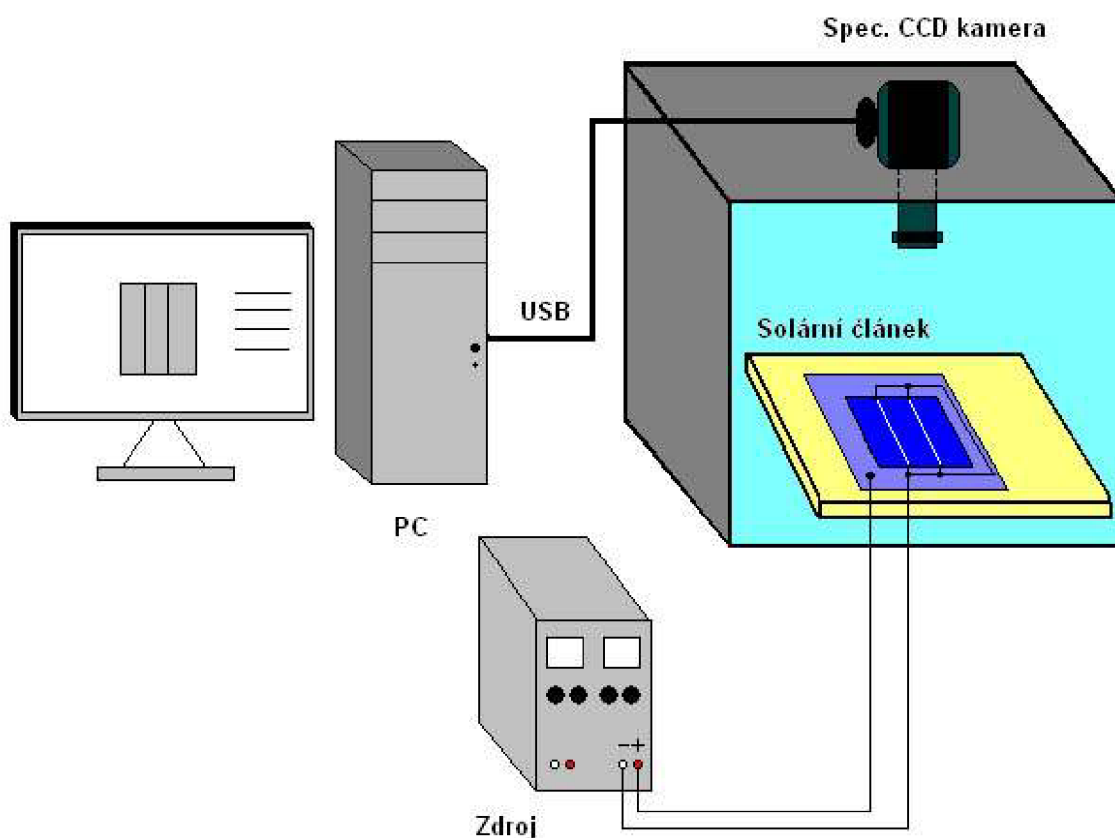
Elektroluminiscence je podstatně rychlejší metodou oproti metodám LBIC nebo LBIV. Tento typ metody se stejně jako metody předešlé využívá pro zjišťování materiálových, optických i elektrických vlastností článku. Solární článek je napájen proudem 2-3A a speciální CCD kamera snímá měřený článek po dobu několika sekund. Solární článek je uzavřen v prostoru se zamezeným přístupem světla. Po sejmutí obrazu kamerou je snímek poslán do PC, kde je zobrazen. Výsledky změřené touto metodou jsou shodné s výsledky změřenými metodami LBIC a LBIV. Zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou Elektroluminiscence

### 3.4 Detekce defektů pomocí záření mikroplazmy

Měření defektů pomocí mikroplazmy je velice podobné jako měření pomocí elektroluminiscence. Jediným rozdílem této metody je zapojení solárního článku v závěrném směru. Aby nedošlo k poškození článku, zejména k narušení PN přechodu, je nutné dbát na správné nastavení napájecího napětí článku (2-10V, dle typu článku). Pokud je článek poškozený například nestejnorodou krystalickou mřížkou, vytvářejí se díky zvýšení teploty v místech poškození jasně svítící skvrny – mikroplazmy. Tyto mikroplazmy jsou snímány speciální CCD kamerou a přenášeny do PC. Zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na obr. 3.3.

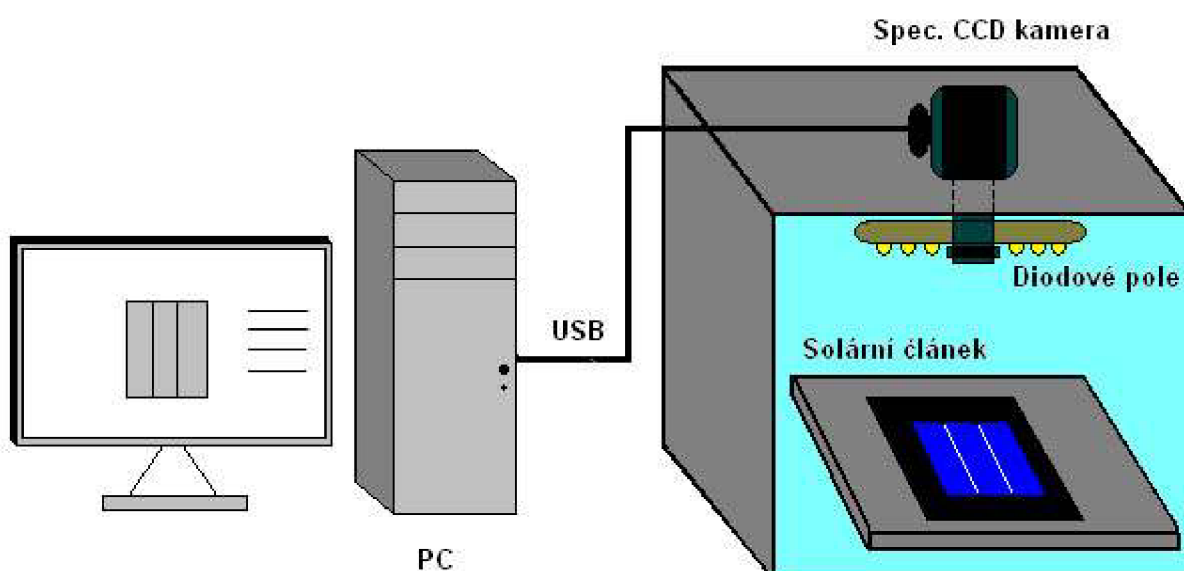


Obr. 3.3: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou záření Mikroplazmy



### 3.5 Detekce defektů pomocí fotoluminiscence

Pomocí metody fotoluminiscence se zjišťují nehomogenity struktury solárních článků. Realizace zapojení měřicího pracoviště je podobná jako u předešlých 2 metod s tím rozdílem, že solární článek není napájen, ale je buzen ultrafialovým zářením v našem případě konkrétně diodovým polem o vlnové délce 405nm. Digitální kamera světelné generování článku přes IR filtr zachytí a výsledný obraz se vykreslí na PC. Fotoluminiscence se často využívá v průmyslu k rychlé detekci defektů solárního článku. Zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou Fotoluminiscence

### 3.6 Fotoluminiscence [12]

Fotoluminiscence je druh luminiscence vyvolaný energií dopadajícího elektromagnetického záření. Řídí se Stokesovým zákonem, podle něhož má vybuzené světelné záření vždy větší vlnovou délku (menší energii) než budící záření. Proto lze luminiscenci vyvolat jen výjimečně viditelným světlem, obvykle je třeba použít ultrafialové nebo rentgenové záření. Fotoluminiscenční zobrazení se ukazuje jako rychlý charakteristický nástroj, dovolující variace doby života minoritních nosičů náboje uvnitř velké plochy křemíkových vrstev, měřící s velkým prostorovým rozlišením a s daty získanými během jediné sekundy.

## Luminiscence

Luminiscence je přebytek záření nad tepelným vyzařováním tělesa v tom případě, má-li toto přebytečné záření konečnou dobu trvání, jež podstatně převyšuje periodu světelných kmitů.

Luminiscence je emise světla z nějaké látky a nastává z elektronových excitovaných stavů. Luminiscenci můžeme rozdělit:

- *Fluorescenci*
- *Fosforescenci*
- *Zpožděnou fluorescenci*

## Fluorescence

Nastane-li emise záření z excitovaného elektronového stavu jedním či více spontánními energetickými přechody jedná se o fluorescenci. Praktické kritérium - fluorescenci pozorujeme během buzení a po jeho vypnutí prakticky ihned mizí (doba dohasínání je obvykle řádově  $10^{-8}$  s).

Fosforescence.

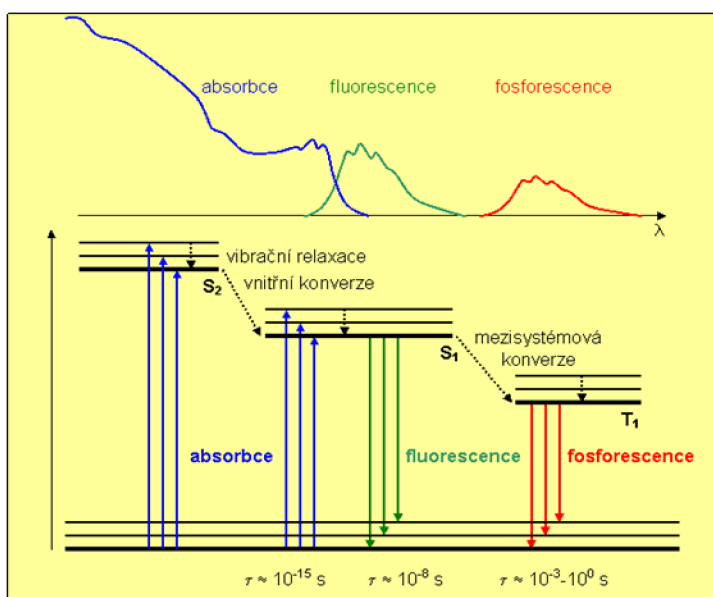
Uplatňuje-li se při emisi záření z excitovaného elektronového stavu metastabilní hladina jedná se o fosforescenci. Praktické kritérium - fosforescence má delší dobu dohasínání než fluorescence ( $>>10^{-8}$  s) a obvykle ji nelze pozorovat v roztocích při pokojové teplotě.

## Zpožděná fluorescence

Zpožděná fluorescence je zářivý přechod z téhož singletního stavu ( $S_1$ ) jako při fluorescenci, ale s delší dobou dohasínání danou časem, po který je molekula v metastabilním tripletovém stavu.

Pro luminiscenci je také charakteristické snižování kvantového výtěžku s rostoucí teplotou tzv. tepelné zhášení luminiscence. Na obr. 1 je zjednodušené schéma zářivých a nezářivých přechodů mezi elektronově vibračními stavy složité molekuly a tvar absorpčních a emisních spekter ( $\lambda$  - vlnová délka). Po absorpci světelného kvanta budícího záření (viz modré šipky) přechází elektrony ze singletního stavu  $S_0$  do excitovaných singletních stavů  $S_1$ ,  $S_2$ , ... a tripletních stavů  $T_1$ ,  $T_2$ , .... Molekula

obvykle přejde ze rovnovážné vibrační hladiny stavu  $S_0$  do některé z vibračních hladin excitovaných stavů. K deexcitaci molekuly dochází buď zářivými přechody (luminiscence; viz zelené a červené šipky) nebo nezářivými přechody (vnitřní konverze, mezisystémová konverze, vibrační relaxace; viz černé tečkované šipky). Doba trvání jednotlivých procesů je pro absorpci řádově  $10^{-15}$  s, pro fluorescenci  $10^{-8}$  s, pro fosforescenci je mnohem delší než  $10^{-8}$  s (obvykle milisekundy až sekundy), pro vibrační relaxaci  $10^{-12}$  -  $10^{-13}$  s, pro vnitřní konverzi  $10^{-6}$  -  $10^{-12}$  s, pro mezisystémovou konverzi  $10^{-4}$  -  $10^{-12}$  s.



**Obr. 3.5: Zářivé a nezářivé přechody mezi elektronově vibr. stavy složité molekuly**

Z obr. 3.5 vyplývá, že:

- **fluorescence** je spinově dovolený zářivý přechod, obvykle z rovnovážné vibrační hladiny stavu  $S_1$  do některé z vibračních hladin základního stavu  $S_0$ .
- **fosforescence** je zářivý přechod z vyššího ( $T_1$ ) do energeticky nižšího stavu o rozdílné multiplicitě ( $S_0$ ).
- **zpožděná fluorescence** je zářivý přechod z téhož singletního stavu ( $S_1$ ) jako při fluorescenci, ale s delší dobou dohasínání danou časem, po který je molekula v metastabilním tripletovém stavu. Doba dohasínání zpožděné fluorescence je přibližně rovna době dohasínání fosforescence měřené za stejných podmínek. Emisní spektrum zpožděné fluorescence je totožné s emisním spektrem okamžité fluorescence.

## 4 Mechanický návrh měřicího pracoviště

Před samotným realizováním mechanického návrhu měřicího pracoviště pro měření fotoluminiscence pomocí zpětného transmisního osvětlení je nejdříve nutné definovat určité požadavky realizace:

- Inovace měřicího pracoviště při zachování stávající struktury zařízení
- Umožnění neomezeného měření všemi používanými metodami
- Co možná největší omezení vlivu mechanických úprav
- Rychlé a jednoduché konfigurování měřicího pracoviště

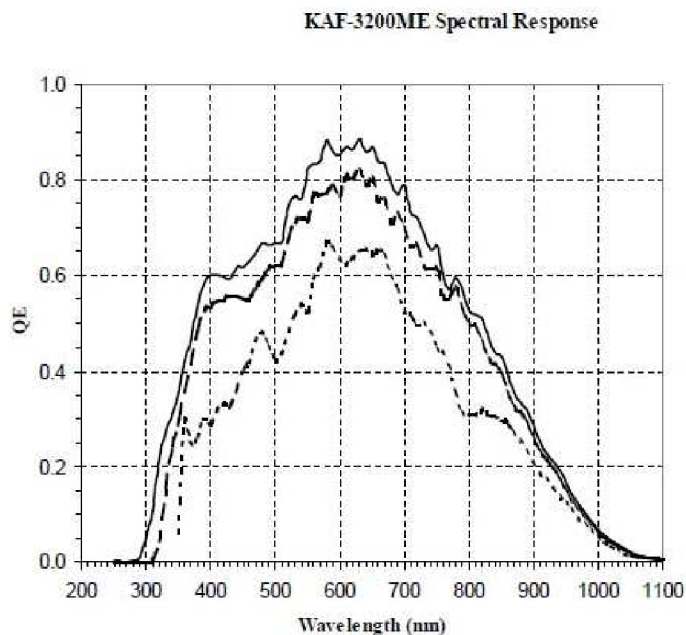
### 4.1 Úvod do problematiky

Měřicí pracoviště, které je inovováno se využívá také k měření jinými metodami detekce defektů solárních článků a to pomocí elektroluminiscence, mikroplazmy a fotoluminiscence. Veškeré měření probíhá v temném uzavřeném boxu, který díky černé vnitřní části a speciálním uzavíratelným dvířkům zabraňuje pronikání parazitního světelného záření z venkovních prostor. Tím nedochází ke zkreslení naměřených výsledků solárních článků (základní struktura měřicího boxu viz. obr. 4.2-4.4). Měřicí box je na vrchní části opatřen otvorem, kam se umísťuje speciální CCD kamera Kodak G2-3200 (obr. 4.1a), která snímá pomocí komerčního fotografického objektivu Canon EOS luminiscenci měřených solárních článků. Kamera je napájena 12V síťovým adaptérem a připojena k PC pomocí rozhraní USB 2.0. Obrázky jsou díky této přenosové technologii rychle převedeny do počítače a disponují vysokým rozlišením 2184(H) × 1472(V) pixelu. Filtrové kolo, zabudované v těle kamery, je používáno k výběru pouze specifické části elektromagnetického spektra (obr 4.1b). Je zde 5 možností filtrace elektromagnetického spektra, které jsou nastavovány programem v počítači (obr. 4.2):

- Clear – měření probíhá bez filtrace
- Red – objektiv propouští pouze vlnové délky 625 až 740 nm
- Green – objektiv propouští pouze vlnové délky 520 až 565 nm
- Blue – objektiv propouští pouze vlnové délky 430 až 500 nm
- IR – 742 - objektiv propouští pouze vlnové délky 760 nm až 1 mm



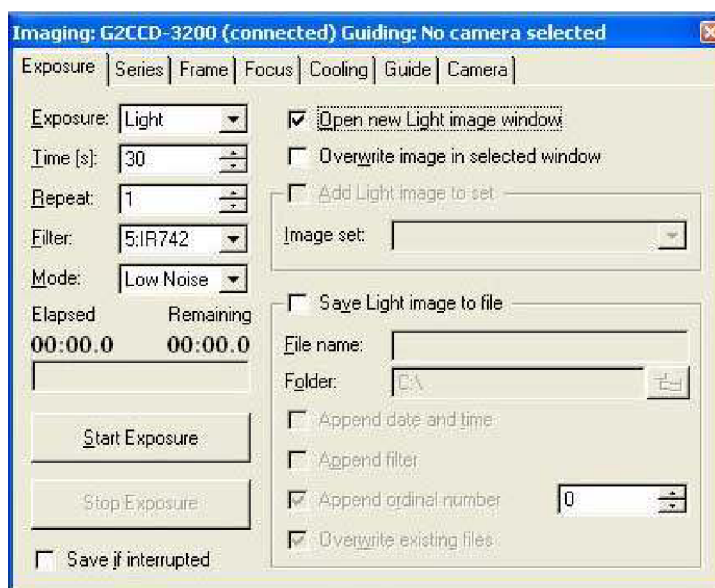
a)



b)

Obr. 4.1:a) CCD kamera Kodak G2-3200 b) Spektrum snímaných vln. délek[10]

Pomocí programové výbavy lze také definovat teplotní provozní režimy mikročipu (pro naše měření postačí chlazení  $-20^{\circ}\text{C}$ ), nastavovat různé délky časů měření expozice, modifikovat pořízené obrázky pomocí různých světelných režimů atd. [10]



Obr. 4.2: Software pro nastavování filtrů a expozice

## Popis ovládacích funkcí programu:

- **Exposure** – typ expozice
- **Time(s)** – doba snímání obrazu
- **Repeat** – počet opakování snímání
- **Filter** – nastavování 5 typů světelného filtru
- **Mode** - nastavení vlivu šumu (Low noise, High noise)
- **Elapsed/Ramining** - definování aktuální hodnoty času sepnutí snímání CCD kamery
- **Start Exposure** - spuštění samotné expozice snímku

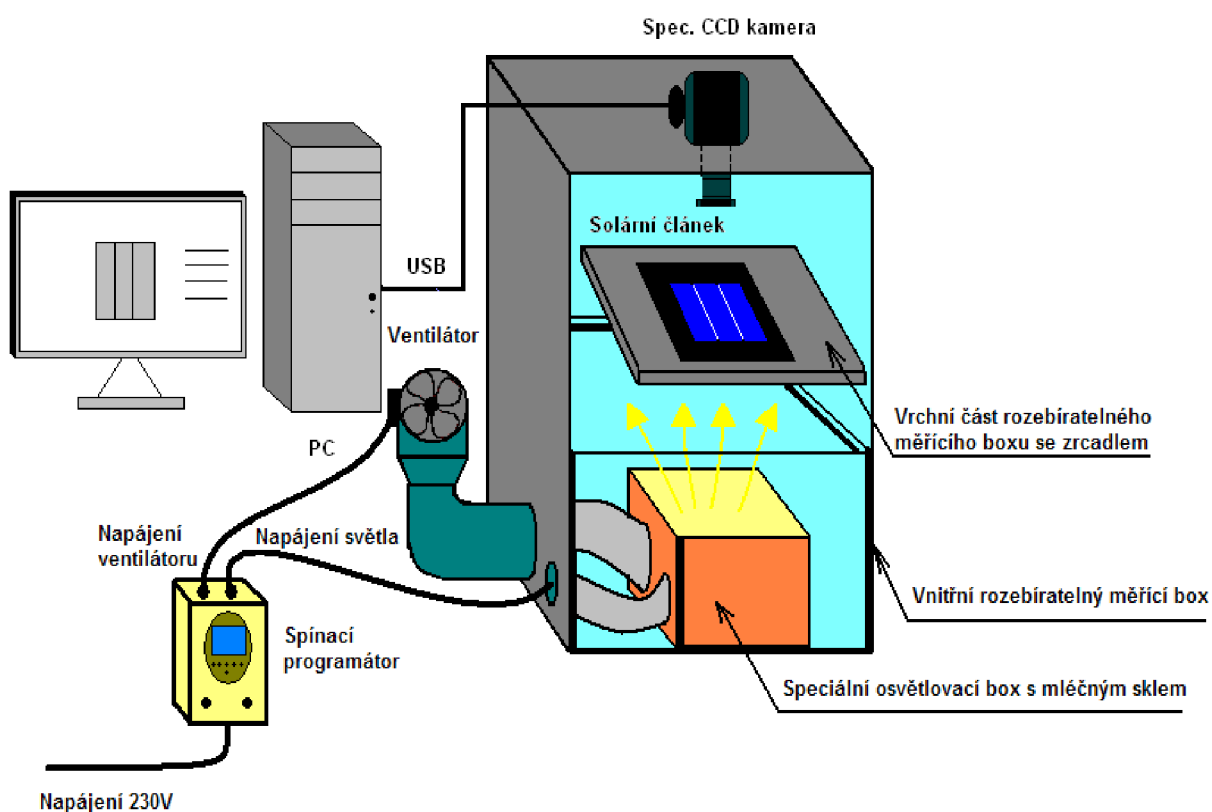
Obecně měření spočívá v umístění článku do měřicího boxu a aplikováním propojení dílčích částí se solárním článkem dle typu měření (podrobnější popis propojení viz. kapitoly 3.3, 3.4, 3.5).

V našem případě je nutné modifikovat měřicí box takovým způsobem, aby světelný zdroj osvětloval spodní část článku a vrchní část byla snímána CCD kamerou. Přitom nesmí procházet žádné světlo kolem měřeného článku, protože CCD kamera je uzpůsobena k tomu, aby zaostřovala na nejsvětlejší část snímaného spektra a to by bylo tímto parazitním světlem znemožněno. Zdroj světla musí být dostatečně silný, aby vyvolal transmisní generování volných nosičů náboje. Spínání světelného zdroje je částečně automatizované pomocí spínacího programátoru, kde lze nastavit širokou škálu jak spínacích, tak vypínacích časů zdroje světla. Zdroj světla umístěný ve speciálním osvětlovacím boxu s mléčným sklem je nezbytné chladit vzduchem pomocí systému pospojovaných ventilačních prvků s aktivním vysokootáčkovým ventilátorem.

## 4.2 Popis schématu inovovaného měřicího pracoviště

Na obr. 4.3 je schématické zobrazení fotoluminiscenční experimentální diagnostické metody s transmisním osvětlením při pohledu do vnitřní části. Celkové měřicí zapojení se skládá z několika částí:

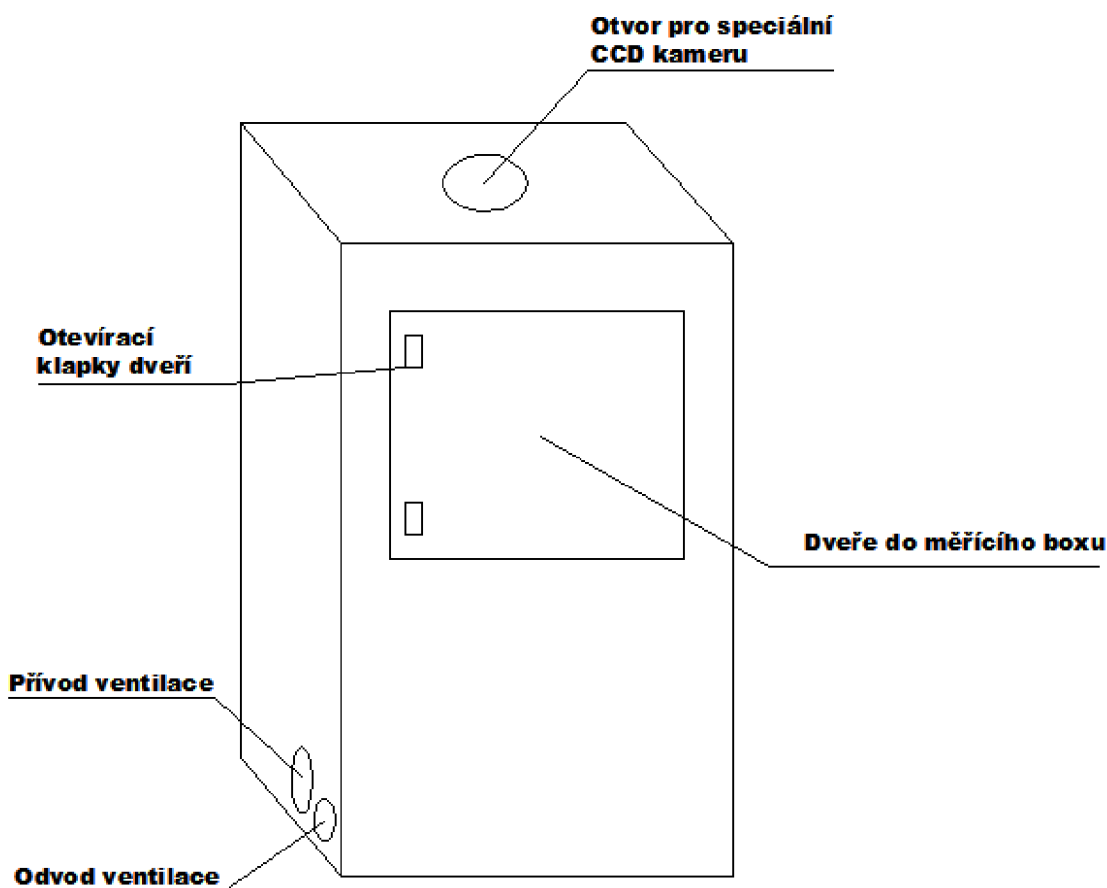
- Stávající měřicí box
- Vnitřní rozebíratelný měřicí box
- Vrchní část rozebíratelného měřicího boxu s upraveným zrcadlem
- Speciální osvětlovací box s mléčným sklem
- Součástí osvětlovacího boxu je také halogenový světelný zdroj 500W
- Ventilační systém
- Spínací programátor



Obr. 4.3: Struktura diagnostické metody s transmisním osvětlením

### 4.2.1. Úprava stávajícího měřicího boxu

Měřicí box (obr. 4.4), který je využíván jinými diagnostickými metodami bylo nutné modifikovat pro účely měření pomocí transmisního osvětlení. Vzhledem k tomu, že ve speciálním osvětlovacím box s mléčným sklem vlivem halogenového světla dochází při osvětlování k vzrůstu teploty, je nutné tento prostor odvětrávat a do boční konstrukce měřicího boxu musely být vyvrtány 2 otvory. První s průměrem otvoru 50 mm je určen pro přívod ventilace do boxu a druhý otvor s průměrem 40 mm pro odvod teplého vzduchu ven z prostoru. Aby ostatní diagnostické metody fungovaly i nadále, bylo nutné opatřit otvory vývodkami M63/IP65 (vnitřní průměr 50 mm) a M50/IP65 (vnitřní průměr 40 mm), které mohou zabránit přístupu světla dovnitř měřicího boxu a zároveň slouží k uchycení ventilačních plastových trubek.

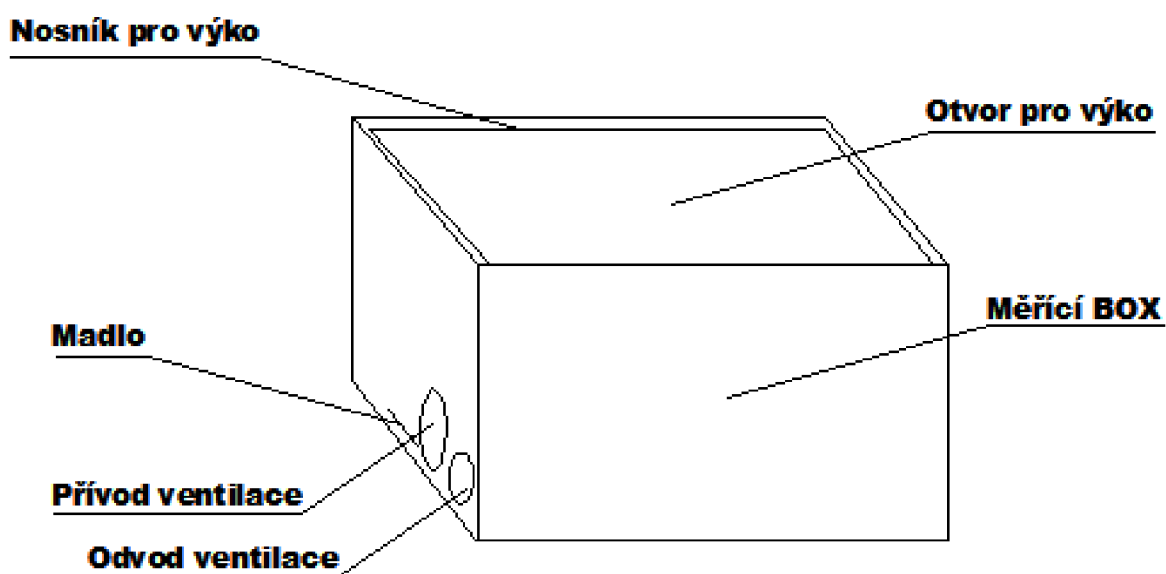


Obr. 4.4: Schéma stávajícího upraveného měřicího boxu



#### 4.2.2. Vnitřní rozebíratelný měřicí box

Tento box byl vyroben s velice přesnými rozměry tak, aby se na něj mohl přesně nasunout stávající měřicí box a tvořili spolu těsné spojení eliminující jakékoliv parazitní záření vnikající z prostoru laboratoře. Pro jednodušší rozebrání obou boxů byly na spodní část rozebíratelného měřicího boxu přimontovány úchyty. Na straně stávajícího boxu byly pro tyto úchyty vyrobeny otvory. Na boční části jsou stejně jako v předešlém boxu vyvrtány 2 otvory s průměry 50 mm a 40 mm sloužící pro přívod a odvod vzduchu. Tyto otvory si svou polohou odpovídají tak, aby jimi mohly projít vývodky a z vnitřní strany je bylo možné matici stáhnout. Vnitřní část rozebíratelného měřicího boxu je 1,5 cm od vrchního rámu tvořena nosíkem tvaru L a to po celém obvodu, sem se poté položí vrchní část rozebíratelného měřicího boxu s upraveným zrcadlem. Tento malý nosík je na povrchu opatřen izolační gumou a ve spojích vytmelen, tím se opět maximálně sníží průnik světla. Konstrukční schéma je zřejmé z obr. 4.5.



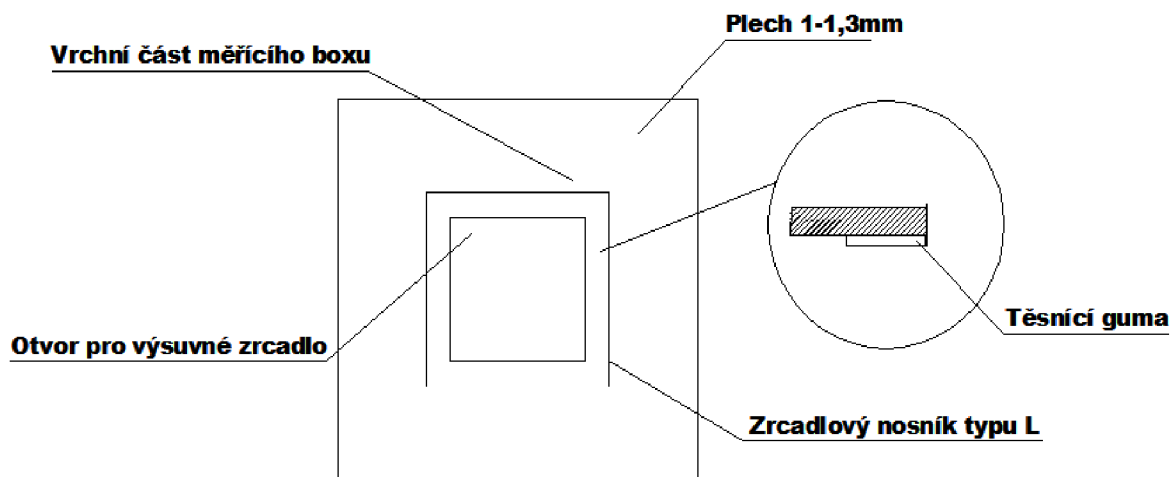
Obr. 4.5: Schéma rozebíratelného měřicího boxu

#### 4.2.3. Vrchní část rozbíratelného měřicího boxu s upraveným zrcadlem

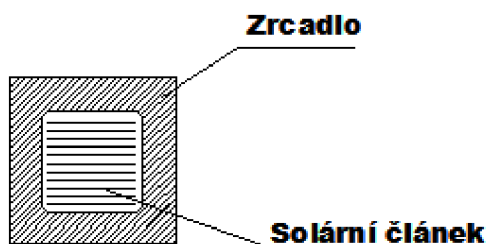
Tento blok je jedním z nejdůležitějších prvků při měření metodou transmisního osvětlení článku protože tvoří světelnou hranici mezi zdrojem budícího záření ze spodní části a vrchní částí snímané speciální CCD kamerou. Po celém obvodu je

přilepen 20 mm široký pás gummy, který přesně lemuje pogumovaný nosník a tvoří tím nepropustný světelný spoj. Ve středu plechové části je umístěn otvor 170x170mm kam se ze spodní části do nabodovaných zrcadlových nosníků typu L zasouvá speciálně upravené zrcadlo. Volba takovýchto rozměrů otvoru je záměrná, protože metoda měření je díky tomu vhodná pro všechny typy velikostí vyráběných solárních článků (4,5 a 6 palců). Pokud tedy bude v budoucnu potřeba změřit článek větších rozměrů, jednoduše stačí pouze vyměnit zrcadlo. Při našem měření byly k dispozici pouze 4“ velikosti solárních článků (obr. 4.6).

Zrcadlo (obr. 4.7) je na spodní straně zbaveno ochranné barvy a postříbřeno takovým způsobem, aby se na odstraněnou plochu mohl položit solární článek s minimálním únikem světla na rozhraní odebrané a původní vrstvy. Při měření je navíc toto rozhraní zakryto silnou gumou a zatíženo, aby nedošlo k průniku světla do měřicího boxu. Zrcadlo bylo zvoleno z důvodu své vlastnosti odrazivosti světla, odstraněná plocha propouští světlo vlnových délek stejných jako standardní sklo a tak nejlépe poslouží našemu účelu.



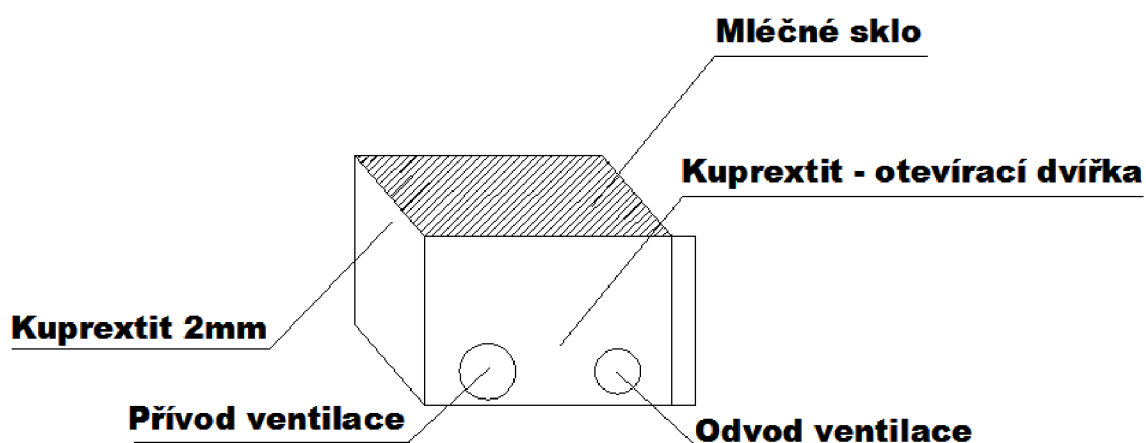
Obr. 4.6: Vrchní část rozebíratelného měřicího boxu



Obr. 4.7: Speciálně upravené zrcadlo pro potřeby měření

#### 4.2.4. Speciální osvětlovací box s mléčným sklem

Generaci světelné energie zajišťuje osvětlovací box umístěný v rozebíratelném měřicím boxu (obr. 4.8). Konstrukce je tvořena kuprexitovými pláty pospojovanými dvojitými plechy a šrouby. Kuprexit byl zvolen jako konstrukční materiál z důvodu vynikajících tepelné odolnosti. Stěny boxu jsou na svých rozhraních zatmeleny unikátním tmelem se zvýšenou teplotní odolností (teplotní odolnost může dosahovat krátkodobě až 300°C). Horní část boxu je opatřena mléčným sklem. Sklo tohoto typu totiž dokáže velkou měrou rovnoměrně rozptýlit světelné záření a zdroj světla tak není pouze bodový. Přední stěna osvětlovacího boxu je jednoduše odnímatelná a zajištěná západkou. Jsou zde také zhotoveny 2 otvory 50 mm a 40 mm určené pro vzduchovou ventilaci. Ventilace je sem přiváděna pohyblivou soustavou hadic UNI-50 a UNI-38 zakončených na vývodkách boxu. Uprostřed přední stěny ze vnitř je umístěna vzduchová přepážka zajišťující správnou cirkulaci vzduchu. Dvnitř osvětlovacího boxu je vloženo halogenové svítidlo o výkonu 500W, které při zapnutí měření generuje velké množství tepla. Napájení světla je realizováno speciálním bezhalogenovým kabelem D-PREN 155 odolným teplotám do 170°C. Kabel je veden otvorem sloužící pro odvod teplého vzduchu a připojen k systému programovatelného spínače osvětlení.

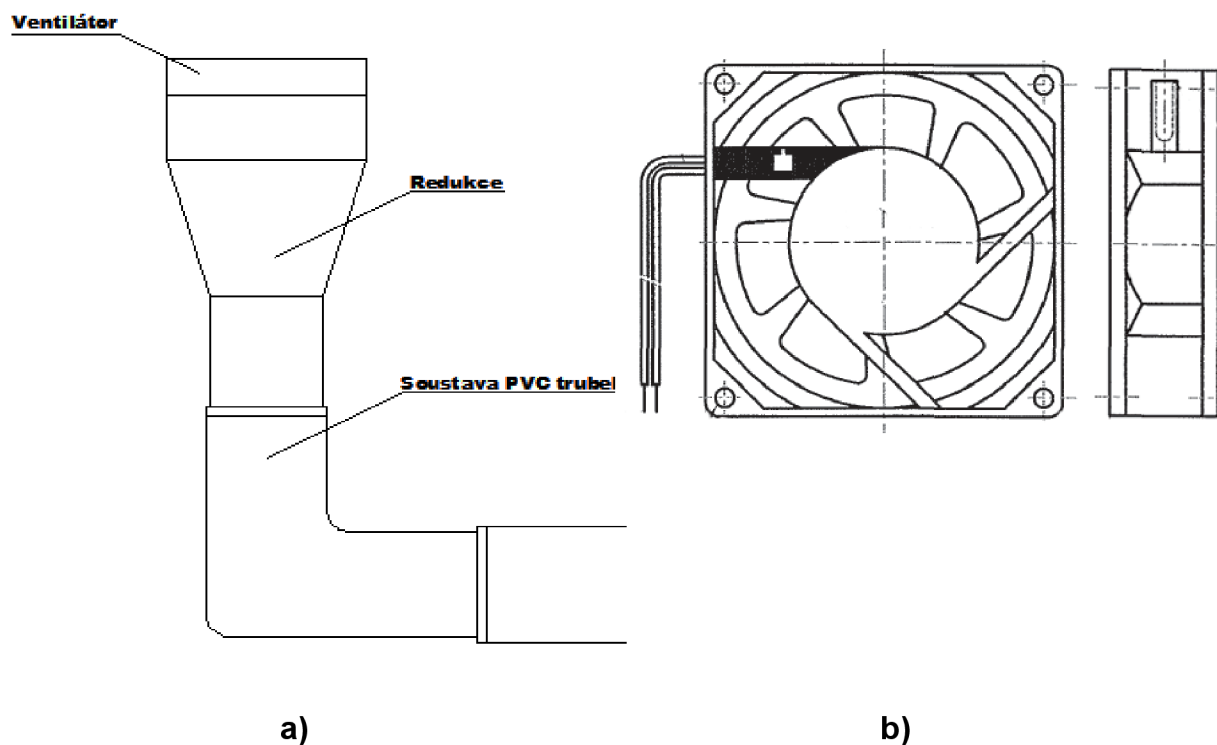


Obr. 4.8: Osvětlovací větraný box s mléčným sklem

## 4.2.5. Ventilační systém

Osvětlovací box s mléčným sklem produkuje při svém provozu poměrně velké množství tepla až 80°C. Pokud by uvnitř nebyl dostatečně odvětráván, mohla by se teplota ještě podstatně zvýšit a zbytečně by docházelo k zahřívání použitých konstrukčních částí, proto zde byl zhotoven ventilační systém, který částečně eliminuje nepřiměřené zvyšování teploty.

Ventilační systém se skládá z několika částí. Mezi všemi boxy jsou do připravených otvorů umístěny přívodní a odvodní hadice, pro přívod byla zvolena hadice s již zmiňovaným průměrem 50 mm a pro odvod postačí hadice s průměrem 40mm, která přebytečné teplo odvádí ven do prostoru mimo boxy. Na straně přívodu do hadice je z několika trubek s pravouhlým i s přímým tvarem zhotoven ventilační průduch, který je na své vstupní straně opatřen redukcí s rozšiřujícím zakončením, kam se namontoval výkonný ventilátor napájen 230V, 50/60Hz. (obr.4.8a) Ventilátor (obr. 4.9b) disponuje rozměry 80x80x25 a rychlost otáček se pohybuje 2300 – 2750 ot/min.



Obr. 4.9: a) Soustava PVC trubek s ventilátorem b) Schéma ventilátoru [11]

## 4.2.6. Spínací programátor

Průmyslový spínací programátor RP-7494 se záložní baterií obsahuje mnoho spínacích režimů a je začleněn do měřicího pracoviště z důvodu umožnění realizovat částečné automatizované měření pomocí časového spínání zdroje světla. Umístěn je v plastové krabičce SCAME-685.206 IP/65 spolu s nezbytnou elektrickou propojovací výbavou, která bude popsána později. Pro experimentální měření metodou transmisního osvětlení solárního článku je nutné nastavovat různé časy spínání zdroje světla a to nejen v řádech minut, ale také jen několik málo sekund. Tím se při následných měřeních realizovaných postupně za sebou výrazně snižuje tvorba tepelného záření uvnitř osvětlovacího boxu a ochlazuje se tím také měřený solární článek, protože na něj nedopadá žádné světelné záření.

Funkce spínacího programátoru při měření spočívá v sepnutí zdroje světla následované manuálním sepnutím snímání kamerou a odpočtem předdefinované doby vypnutí. Odpočet je detailně zobrazen po sekundách na digitálním displeji. Na obr. 4.10 je uvedeno schéma spínacího programátoru.



Obr. 4.10: Spínací programátor s přepínači

Přívod napájení 230V je realizován na spodní části krabičky typu SCAME a zabezpečen uchycením napájecího kabelu pomocí elektrické vývodky typu PG11.

Vrchní část je také opatřena 2 kusy elektrických vývodek typu PG11 určenými k vedení kabelů napájení k světelnému zdroji a ventilační jednotce.

Ve středové oblasti krabičky je vyroben otvor kam je umístěn spínací programátor, realizující funkci spínání nebo vypínání v definovaných časech.

Posledními prvky jsou nezávislé napájené spínače programátoru a ventilátoru.

## Ovládání spínacího programátor se skládá z těchto sedmi částí:

1. **LCD panel** – zde je zobrazeno odpočítávání času vypnutí nebo zapnutí napájení, možnosti voleb spínání pro konkrétní dny, aktuální čas a mnoho dalších funkcí
2. **SET** – tlačítko slouží k vyvolávání, nastavování, potvrzování a ukládání vybraných voleb
3. **CD** - nastavení programování odpočítávání
4. **RND** – program, který díky vestavěnému generátoru může náhodně generovat spínací a vypínací časy.
5. ← → - tlačítka volby, kterými lze listovat celým nabídkovým menu
6. **ON/OFF** – manuální přepínač přívodu napájení ZAP/VYP
7. **R** – tlačítko sloužící k vynulování všech nastavených hodnot včetně času

Pro naše potřeby měření využijeme zejména program CD. Program odpočítávání umožňuje přístroj zapnout a vypnout na dobu od 1 vteřiny do 23 hod 59 minut a je určený k odpočítávání času, zbývajícího do zapnutí/vypnutí napájení. Nejprve je nutné navolit pomocí tlačítek volby příslušný program odpočítávání CD PROGRAM (3 položka při stisknutí šipky VLEVO). Poté stiskneme tlačítko SET, blikání hodnot nám indikuje možnost modifikace času odpočtu. Pomocí tlačítek volby(← →) definujeme příslušný čas (hodiny / minuty / sekundy), pro posunutí na další časový blok stiskneme vždy tlačítko SET. Posledním nastavením při 4 stisknutí SET je možnost výběru zapnutí nebo vypnutí napájení po uplynutí nadefinovaného času. Po 4 stisknutí SET se nadefinovaný čas uloží do paměti, čímž je programování ukončeno. Pro aktivaci naprogramovaných hodnot je nezbytné na začátku měření stisknout tlačítko CD, které spustí nadefinovaný odpočet.

## Elektrická propojovací výbava (obr. 4.11)

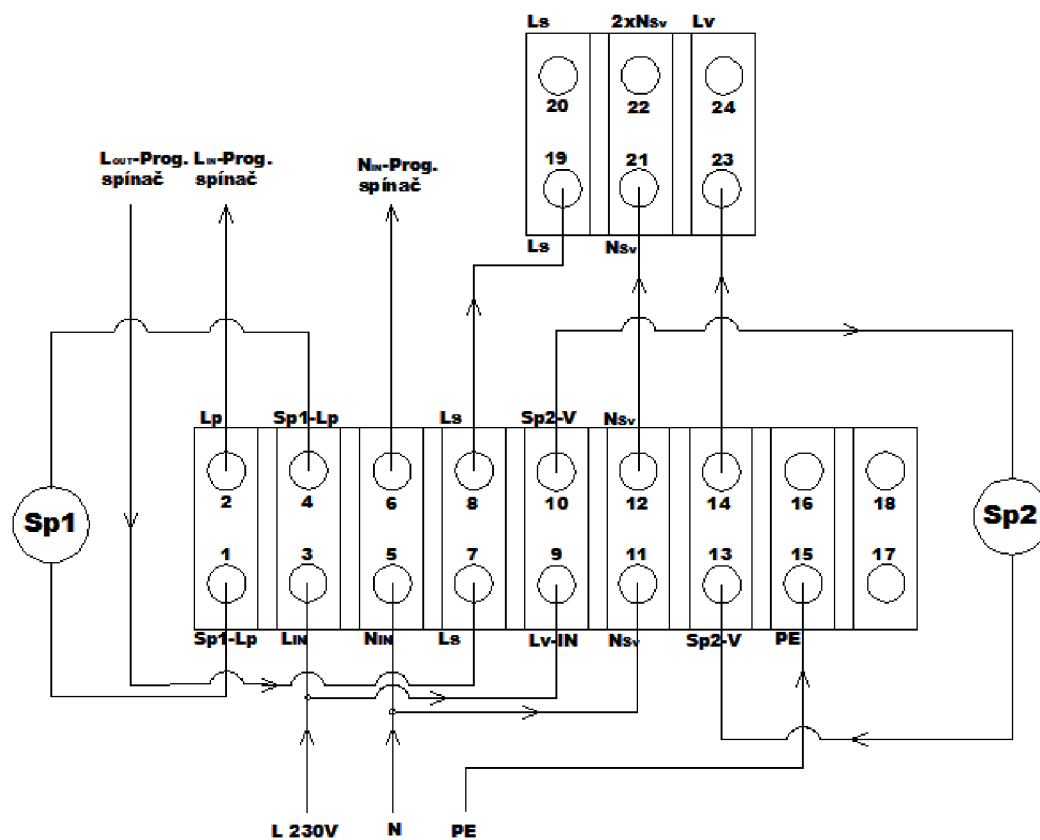
Při výrobě elektrických přístrojů je nutné dbát na bezpečnost, ovladatelnost, rozebíratelnost a správnou funkčnost zařízení. Napájení celého bloku je realizováno pevným připojením napájení ze sítě. Dílčí napájení zdrojů světla a ventilátoru je tvořeno dvěma pohyblivými přívody se zmenšeným upraveným vstupem, protože při rozebírání měřicího pracoviště je nezbytné napájecí kabel světla protáhnout skrze 25 mm otvor hadice. Dotykové plochy dílčích napájení mají navíc na svých přípojných svorkách gumové zábrany omezující dotyk nebezpečných živých částí. Nejen z bezpečnostních důvodů je krabice SCAME opatřena dvěma nezávislými přepínači. První přepínač slouží k napájení spínacího programátoru, který je možné v případě potřeby kdykoliv odpojit, aniž by se musel vyjímat přívod ze zásuvky. Druhý přepínač slouží k zapnutí/vypnutí napájení ventilátoru a přívod energie je nezávislý na přívodu ke spínacímu programátoru. Může tedy fungovat i po ukončení měření a ochlazovat oteplený prostor osvětlovacího boxu. Spínací programátor slouží výhradně k zapínání/vypínání zdroje světla.

Napájení zařízení je připojeno žilovým fázovým vodičem o průměru 1,5 mm na svorku 3 ( $L_{IN}$ ). Svorka 4 ( $Sp_1-L_P$ ) je vyvedena na přepínač  $Sp_1$ , který je spojen se svorkou 1 ( $Sp_1-L_P$ ) a poté díky svorce 2 ( $L_P$ ) připojena na vstup spínacího programátoru ( $L_{IN}$ -Prog. spínač). Střední vodič je kabelem přiveden na svorku 5 ( $N_{IN}$ ) a vyveden svorkou 6 na vstup programátoru ( $N_{IN}$ -Prog. spínač). Ze svorky 5 ( $N_{IN}$ ) je vyveden propoj na svorku 11 ( $N_{SV}$ ), který přes svorky 12, 21 a 22 tvoří střední vodič napájení zdroje světla a ventilátoru.

Výstup spínacího programátoru ( $L_{OUT}$ -Prog. Spínač) je vyveden na svorku 7 ( $L_S$ ) a dále pak pokračuje pře svorky 8, 19 a 20 jako fázový vodič napájení zdroje světla. Z přívodního fázového vodiče L 230V je napětí přivedeno také na svorku 9 ( $L_V-IN$ ) a dále pře svorku 10 ( $Sp_2-V$ ) připojeno na přepínač  $Sp_2$ . Z přepínače napájení vede na svorku 13 ( $Sp_2-V$ ) poté skrze svorky 14, 23 a 24 ( $L_V$ ) připojeno fázovým vodičem k ventilátoru.

Ochranný vodič je přiveden na svorku 15 (PE). Výrobce zařízení navrhl tak, že není nutné připojovat ochranný vodič.

Označení svorek	Význam
L, N, PE	Fázový, střední, ochranný vodič
L <sub>IN</sub>	Napájení ze sítě 230V
Sp <sub>1</sub> -L <sub>P</sub>	Připojení přepínače 1 s vedením fáze na progr. spínač
Sp <sub>1</sub>	Přepínač 1
L <sub>P</sub>	Fáze na vstup progr. spínače
L <sub>IN</sub> -Prog. Spínač	Připojení fáze na progr. spínač
N <sub>IN</sub>	Střední vodič
N <sub>IN</sub> -Prog. spínač	Připojení středního vodiče na progr. spínač
N <sub>SV</sub>	Střední vodič společný pro světlo a ventilátor
L <sub>OUT</sub> -Prog. Spínač	Výstupní spínané napájení z progr. spínače
L <sub>S</sub>	Fáze na vstup zdroje světla
Sp <sub>2</sub> -V	Připojení přepínače 2 s vedením fáze na ventilátor
Sp <sub>2</sub>	Přepínač 2
L <sub>V</sub>	Fáze na vstup ventilátoru



Obr. 4.11: Schéma elektrické propojovací výbavy

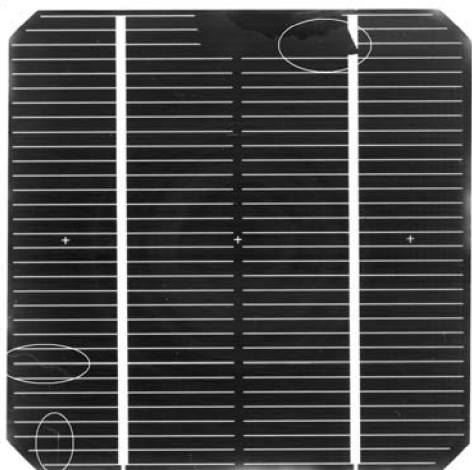


## 5 Zhodnocení výsledků měření současnými diagnostickými metodami

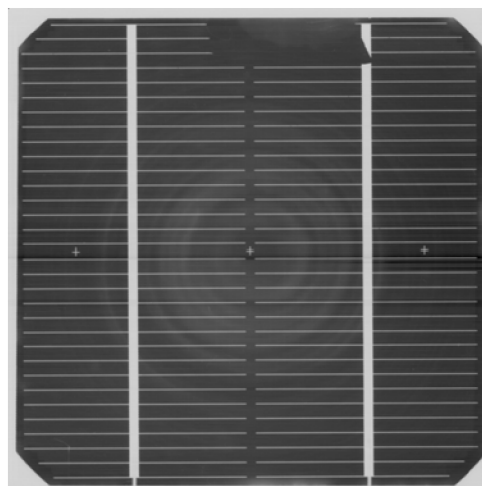
Ve spolupráci s firmou SOLARTEC jsem proměřil tři poskytnuté vzorky solárních článků pomocí metod elektroluminiscence, mikroplazmy a fotoluminiscence. Aby měření bylo maximálně průkazné, zahrnul jsem k těmto diagnostickým metodám také metody LBIC a LBIV a krátce doplnil jejich funkci a vhodnost použití.

### Metody LBIC a LBIV

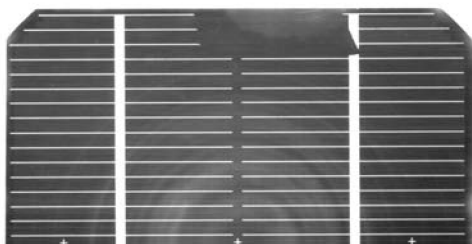
Při měření metodami LBIC a LBIV bylo použito 5 typů diod (LED červená 630nm, modrá 475nm, zelená 530nm, UV 405nm, IR 895nm) s rozdílnou vlnovou délkou pro zjištění nejefektivnějšího zobrazení změřených defektů. Obě tyto metody jsou univerzálními metodami, kde měření je velice přesné, ovšem také velice zdlouhavé. V našem případě při použití nejmenšího kroku trvala doba měření jednoho článku jedním typem diody přibližně 12 hodin. Různé vlnové délky pronikají do odlišných hloubek solárního článku a tím velice přesně definují polohu a velikost defektu. Pro ukázkou jsem vybral z každého typu článku vždy jen 1-2 obrázky s nejlépe viditelným defektem (obr. 5.1 a,b).



Obr. 5.1: a) LBIC-vz. A, LED červená



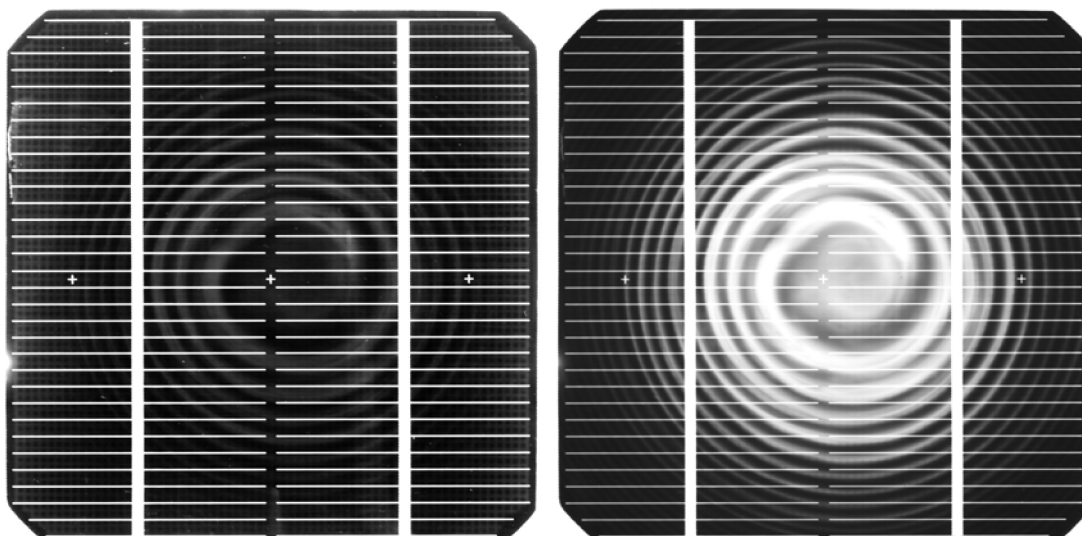
b) LBIC-vz. A, IR dioda



Obr. 5.2: LBIV-vz. A, IR dioda

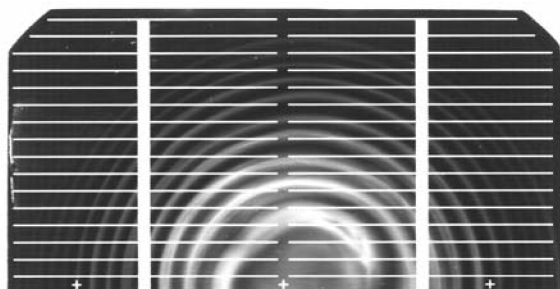
Z obrázku 5.1a vzoru A jsou patrné defekty mechanického poškození způsobené zřejmě neopatrnou manipulací nebo neodborným zacházením při diagnostice solárního

článku. Dále je viditelné poškození kontaktu v horní části článku. Na obrázcích 5.1b a 5.2, pořízených pomocí metod LBIC a LBIV s použitím IR diody je patrný slabý **vírový defekt**. Tento kruhový defekt vzniká při výrobě pomocí Czochralského metody vlivem špatného zpracování křemíku. Vada je způsobena vnikem příměsí do ingotu během procesu otáčení taveniny a tuhnutí. Tato vada je velice závažná, protože tímto defektem bývá postihnuta celá série článku vyrobených z jednoho monokrystalu.



Obr. 5.3: a) LBIC<sup>1</sup>-vz. B, LED zelená

b) LBIC-vz. B, IR dioda



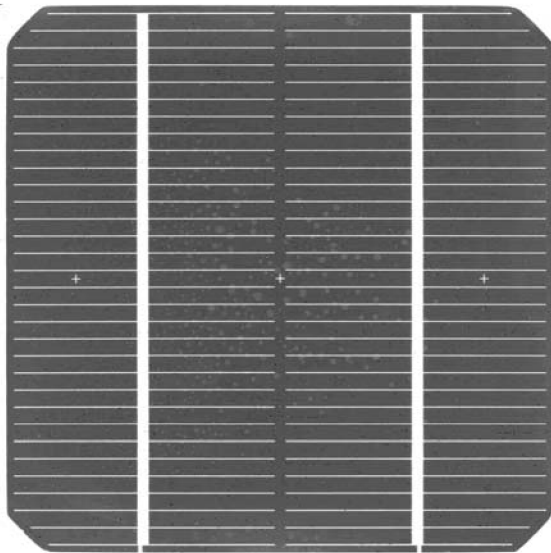
Obr. 5.4: LBIV<sup>2</sup>-vz. B, IR dioda

**Vírový defekt** testovaného solárního článku vzoru B je nejlépe viditelný pomocí IR diody. V tomto případě se jedná o masivní vírový defekt, výrazně ovlivňující funkčnost článku.

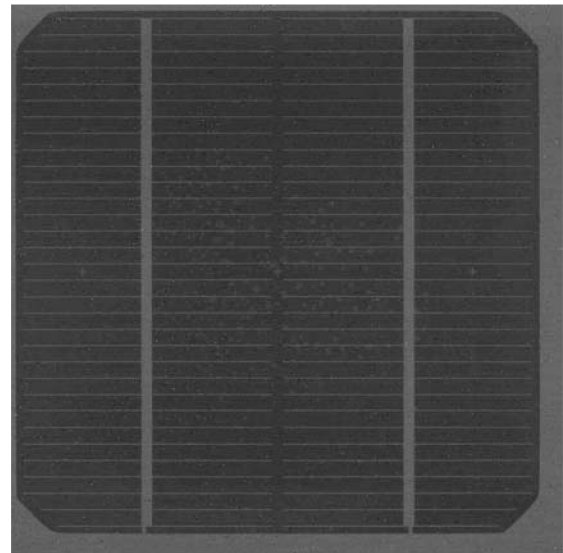
Posledním testovaným článkem byl článek vzoru C. Na tomto článku je patrný **defekt nehomogenity difúzní vrstvy** (světlé tečky ve střední části článku) vznikající při výrobě P-N přechodu například plynným fosforem, do kterého se mohly dostat nežádoucí nečistoty (obr. 5.5 a 5.6).

<sup>1</sup> LBIC - měřicí metoda (Light Beam Inducted Current)

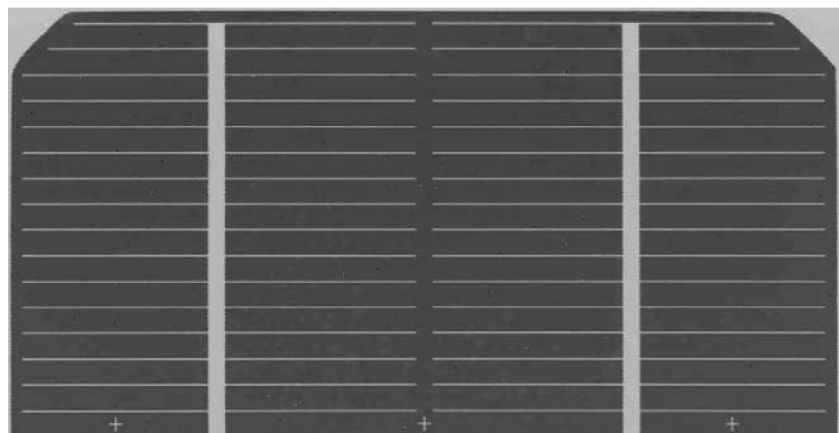
<sup>2</sup> LBIV - měřicí metoda (Light Beam Inducted Voltage)



Obr. 5.5: a) LBIC-vz. C, LED modrá



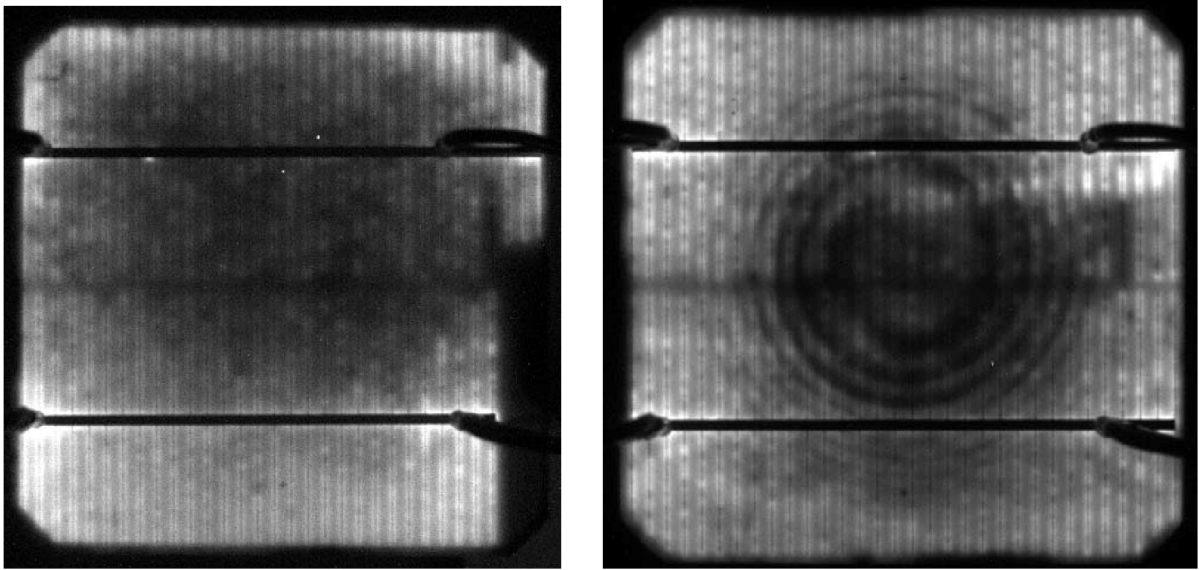
b) LBIC-vz. C, UV dioda



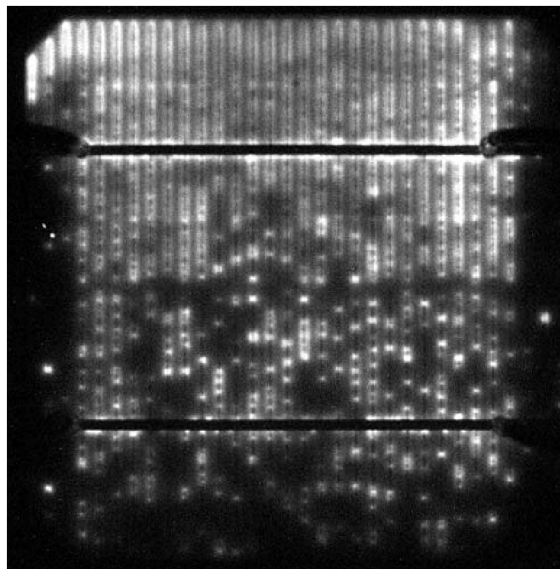
Obr. 5.6: LBIV-vz. C, LED zelená

### Metoda elektroluminiscence

Solární články byly propojeny v propustném směru a tím došlo ke světelné emisi vlivem rekombinace vstříkovaných nosičů náboje. Při použití této metody snímala speciální CCD kamera elektroluminiscenční záření vyzařované plochou článku. Defekty článku jsou na obrázcích zobrazeny tmavými místy. Tato metoda je velice rychlá. Výsledné snímky jsou srovnatelné s výsledky měření metodami LBIC a LBIV (obr. 5.7 a 5.8).



Obr. 5.7: a) Elm - vz. A, IR, 20s, 3A, 1,4V<sup>3</sup> b) Elm - vz. B, IR, 20s, 2,5A, 1,4V



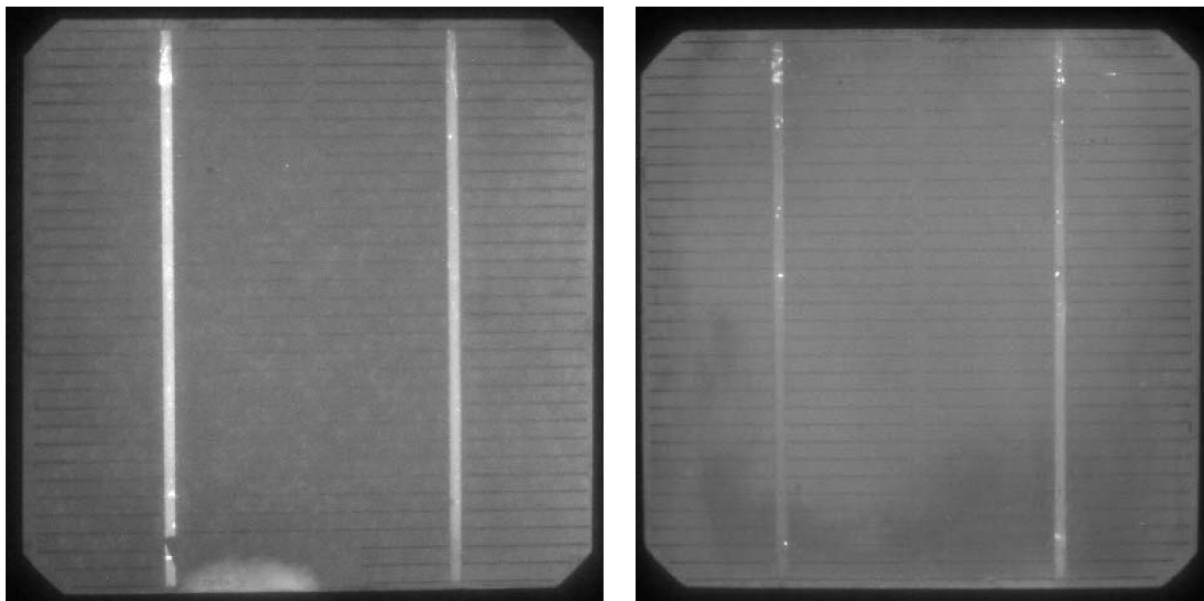
Obr. 5.8: Elm – vz. C, IR, 20s, 3A, 1,4V

### Metoda fotoluminiscence

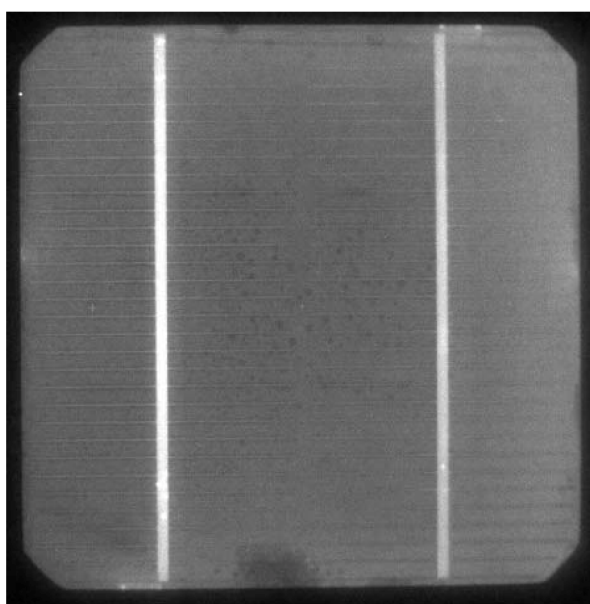
Tato metoda využívá volné nosiče náboje, které jsou generovány pomocí dopadající energie na plochu článku. Při námi provedeném měření jsme použili speciální UV diodové pole, které osvětlovalo měřený článek a následně speciální CCD kamera exponovala výsledný obraz po dobu 10s. Na obr. 5.9 a),b) jsou viditelné světlé body

<sup>3</sup> Vysvětlivky: ELM – měřící metoda pomocí elektroluminiscence, vz. A – vzor článku, IR (IR742) značí, při jakém typu světla speciální CCD kamera (G2-3200, 3,2 MPix, chlazená Peltierovými články na teplotu -20°C) snímá solární článek, 20s – jedná se o délku expozice, 3A – nastavený proud, 1,4V – přidružené napětí,

vodících plošek způsobené nehomogenitou materiálu. Na obr 5.10 je ve střední části dobře viditelný defekt nehomogenity difúzní vrstvy.



Obr. 5.9:a) Ftl - vz. A, IR, 10s, UV LED 24V<sup>4</sup> b) Ftl - vz. B, IR, 10s, UV LED 24V



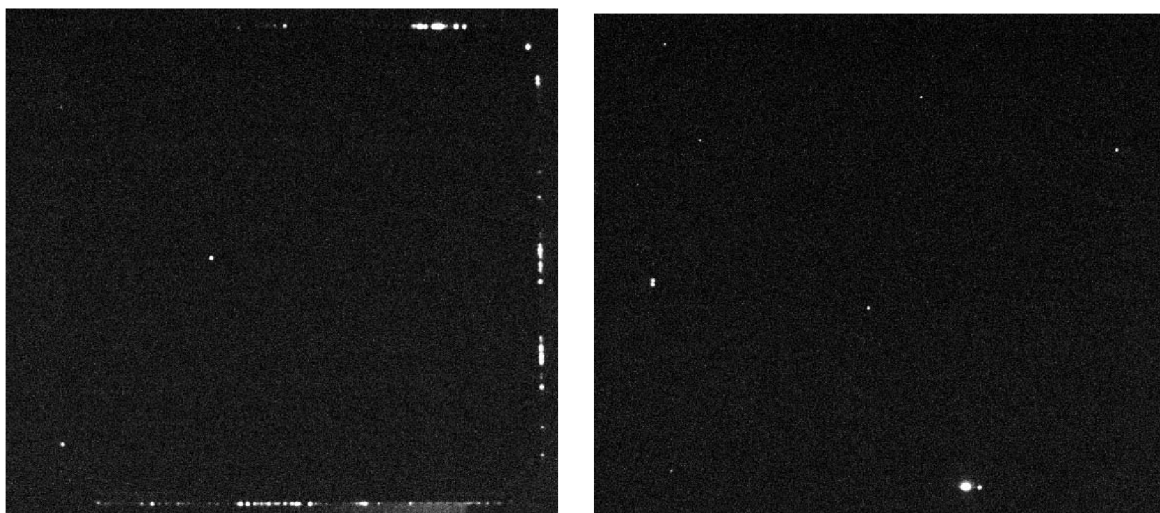
Obr. 5.10: Ftl - vz. C, IR, 10s, UV LED 24V

### Metoda detekce defektů při záření mikroplazmy

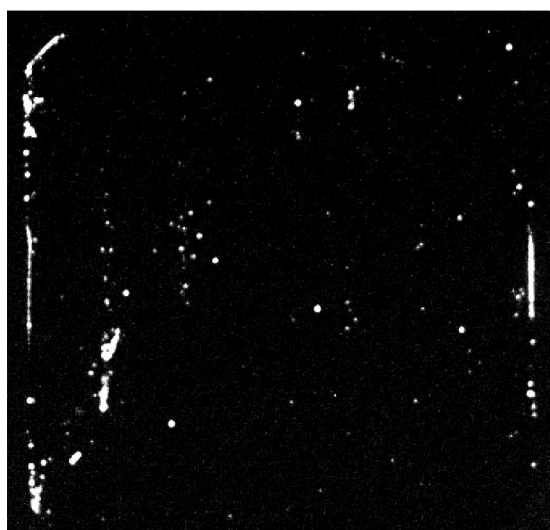
Zapojení měřicího pracoviště bylo téměř totožné se zapojením pro měření elektroluminiscence. Rozdíl byl jen v polaritě napájení solárního článku. Mikroplazmy se v elektrickém měření projevují jako šumy a jsou způsobeny nestejnorodou

<sup>4</sup> Vysvětlivky: Ftl-fotoluminiscence, vz. C – vzor článku, IR (IR742), 10s – doba expozice, UV LED 24V – použití UV diody 24V.

krystalickou mřížkou. Na obr. 5.11a jsou viditelné tyto emise světla zejména po obvodu článku. Obr.5.11b se vyznačuje minimálním počtem těchto defektů ovšem na obr. 5.12 můžeme najít tyto defekty nejen na obvodu, ale i rozprostřené po celé ploše solárního článku. Toto zjištění vypovídá o nekvalitní výrobě nebo významném poškození článku vzoru C.



Obr. 5.11: a) Mkp-vz. A, IR, 20s, 8V, 650mA<sup>5</sup> b) Mkp-vz. B, IR, 20s, 6V, 120mA



Obr. 5.12: Mkp - vz. C, IR, 20s, 6V, 260mA

<sup>5</sup> Vysvětlivky: Mkp – měřicí metoda pomocí mikroplazmy, vz. A – vzor článku, IR (IR742), 20s – doba expozice, 8V - přiváděné napětí, 650mA – přiváděný proud.

## 6 Inovovaná metoda fotoluminiscence s transmisním osvětlením

Před měřením experimentální metodou fotoluminiscence pomocí zpětného transmisního osvětlení (FTO) je důležité sestavit měřicí pracoviště do funkční podoby podle tohoto schématu:

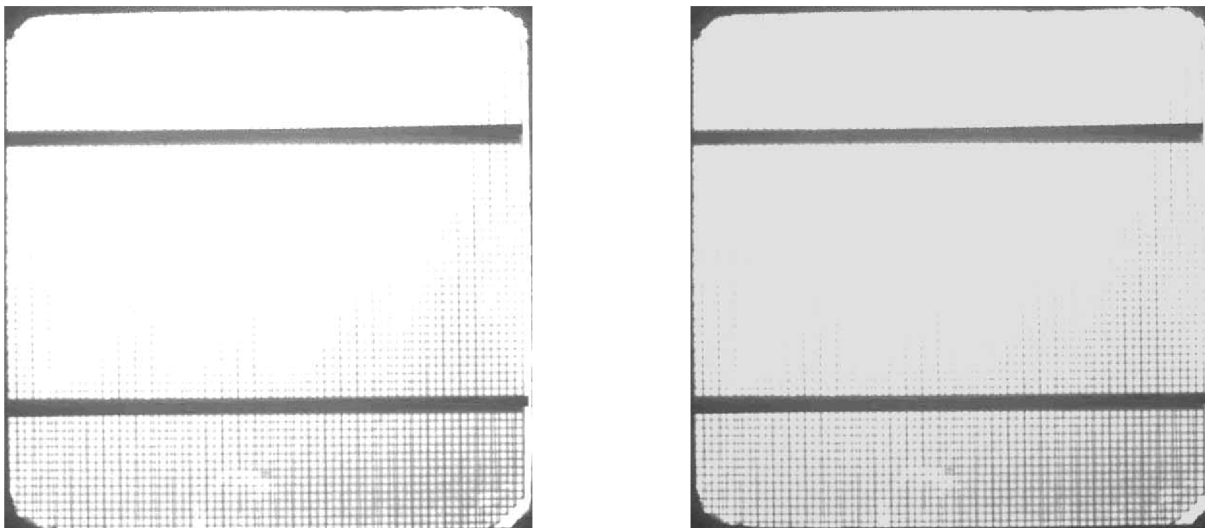
- Umístit rozebíratelný měřicí box do měřicího boxu a namontovat příslušné vývodky propojující oba boxy
- Připevnit ventilační hadice a PVC trubky s ventilátorem do stahovacích částí vývodek
- Vložit do otevřeného osvětlovacího boxu s mléčným sklem halogenové svítidlo a napájecí kabel svítidla prostrčit vývodkou osvětlovacího boxu a vývodní ventilační hadicí ven z měřicího boxu, uzavřít vstupní dvířka osvětlovacího boxu pomocí zářky a pevně spojit ventilační hadice s vývodkami boxu.
- Do vrchní části rozebíratelného boxu nasunout speciálně upravené zrcadlo a položit tuto část na osvětlovací box. Dále zvolit měřený solární článek, opatrně ho položit absorpční stranou směrem k CCD kameře na průhlednou plochu zrcadla, zakrýt a zatížit lemovací gumou.
- Připojit napájení zdroje světla a ventilátoru do vyznačených zdírek a potom připojit samotné napájení spínacího programátoru ze sítě.
- Posledním úkolem je naprogramovat odpočet zapínání/vypínání světla dle potřeby měření na spínacím programátoru

### 6.1 Výsledky měření a problémy metody FTO

V prvním případě byl pro měření použit solární článek vzoru A, kde by měli být patrné stopy poškození a slabý vírový defekt. Tyto defekty byly neměřeny stávajícími metodami a jsou uvedené v rozboru viz. kapitola 5.

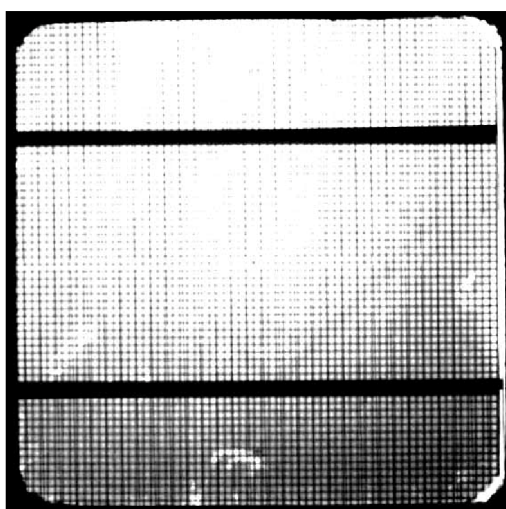
Solární článek byl osvětlen na dobu 10s a na CCD kameře nebyl použit žádný světelný filtr. Vycházeli jsme z teorie, že ke generaci volných nosičů náboje by mělo

docházet vlivem působením silného zdroje světla (proud generovaný solárním článkem měl odpovídat přibližně 1A) a následným průchodem elektronů do vrchní vrstvy. Tuto vlastnost mělo splňovat 500W halogenové světlo. Obrázek byl ovšem přeexponovaný a ani při opakovaném měření s kratší dobou snímání kamery 0,1s nebylo možné detekovat defekty solárního článku.



**Obr. 6.1: a) FTO-vz. A, Clear, 10s, 220V b) FTO-vz. A, Clear, 0,1s, 220V**

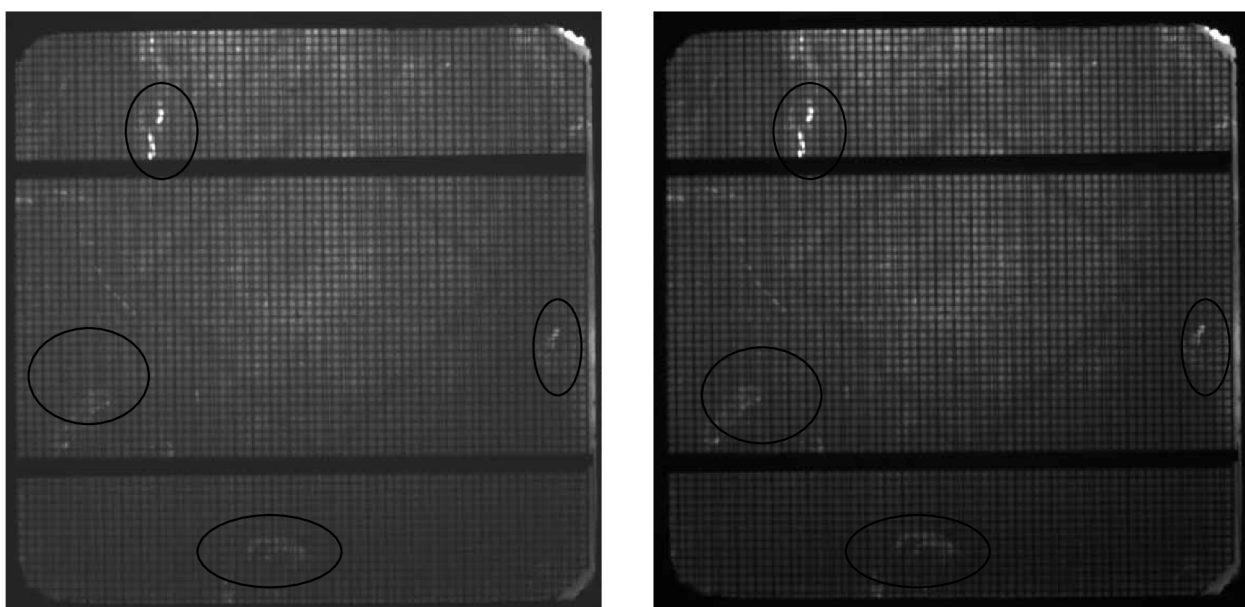
Díky tomuto zjištění bylo nutné snížit světelnou účinnost zdroje světla tak, aby nedocházelo k přeexponování výsledného snímku a zároveň probíhala generace nosičů náboje. Tato varianta měření byla docílena připojením galvanicky odděleného regulovatelného zdroje mezi napájení ze sítě a napájení spínacího programátoru, kde bylo nastaveno napájecí napětí 60V. Na obrázku (obr. 6.2) je již náznak povrchových defektu ve spodní části měřeného článku.



**Obr. 6.2: FTO-vz. A, Clear, 10s, 60V**



Při následných měřeních ovšem nedocházelo k podstatnému zlepšení výsledných obrázků. Důvodem byla ta skutečnost, že procházející IR záření bylo výrazně intenzivnější, než IR záření generované článkem a speciální CCD kamera snímala intenzivnější IR záření. Problém se částečně vyřešil použitím IR filtru Hoya R 72 se střední vlnovou délkou 720nm namontovaným na objektivu CCD kamery. Povrchové defekty jsou již dobře viditelné z obrázků (obr. 6.3 a,b). Samozřejmě se liší svoji polohou od naměřených hodnot pomocí detekční metody LBIC, protože CCD kamera snímá světelné odrazy ze spodní vrstvy článku. Kosočtvercový tvar nacházející se uprostřed článku je zřejmě způsoben zvláštním odrazem světla od mléčného skla osvětlovacího boxu.



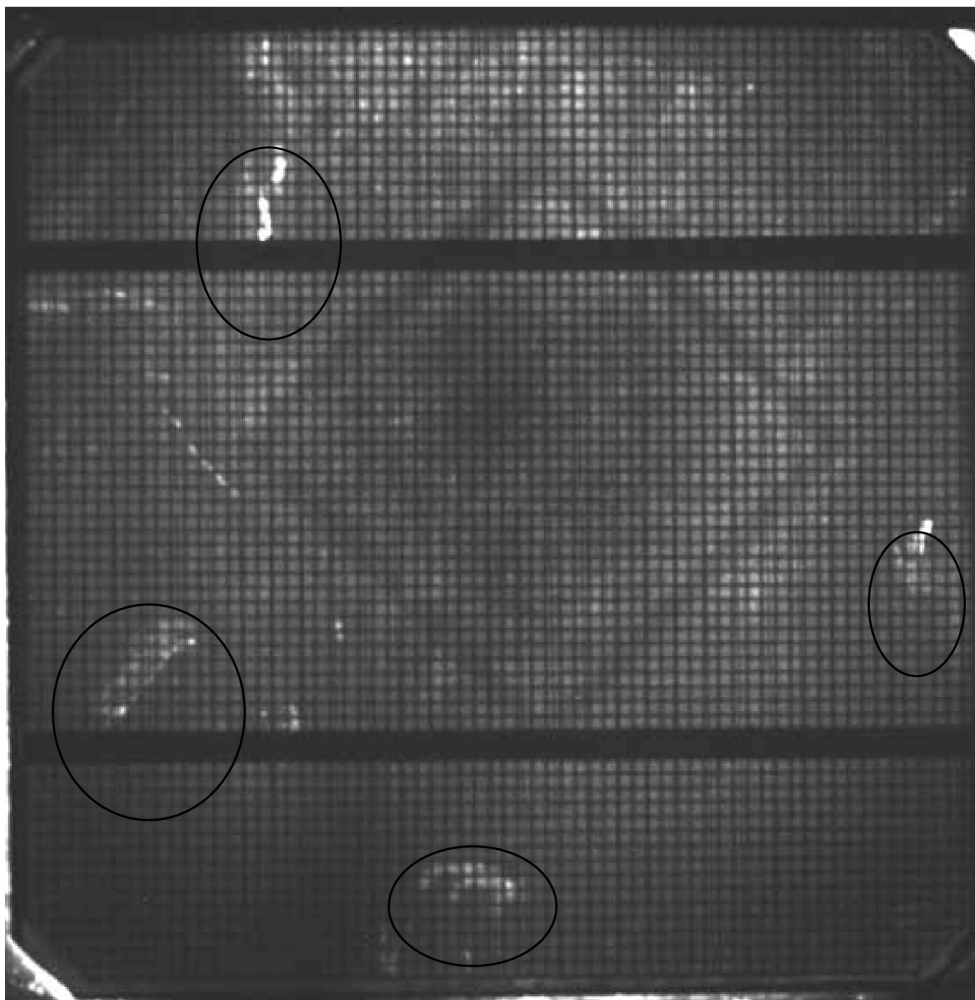
**Obr. 6.3: a) FTO-vz. A, Clear, 10s, 60V, IR b) FTO-vz. A, Clear, 0,1s, 60V, IR<sup>6</sup>**

Metoda tedy poměrně dobře odhaluje povrchové defekty křemíkových solárních článků, ovšem nejsou zde výrazně patrné vnitřní defekty jako je například vírový defekt. Určitý vliv vírového defektu se nachází v centrální části měřeného článku vzoru A, ale není příliš objektivní. Dobře viditelná je zde spodní mřížka článku tvořená stříbrem (Ag) s příměsí hliníku (Al). Aby byly vidět vnitřní defekty, je potřeba pomocí působení světelného zdroje změnit hloubku vniku záření do solárního článku.

<sup>6</sup> FTO-fotoluminiscence s transmisním osvětlením, vz. A –vzor měřeného článku, Clear – typ filtru kamery, 0,1s – doba expozice, 60V – napájení zdroje světla, IR – IR filtr Hoya R 72 na objektivu

Články jsou vyráběny v tloušťkách do 300  $\mu\text{m}$ . Ideální hloubka vniku světla pro detekci vnitřních defektů by byla kolem 100-150  $\mu\text{m}$ .

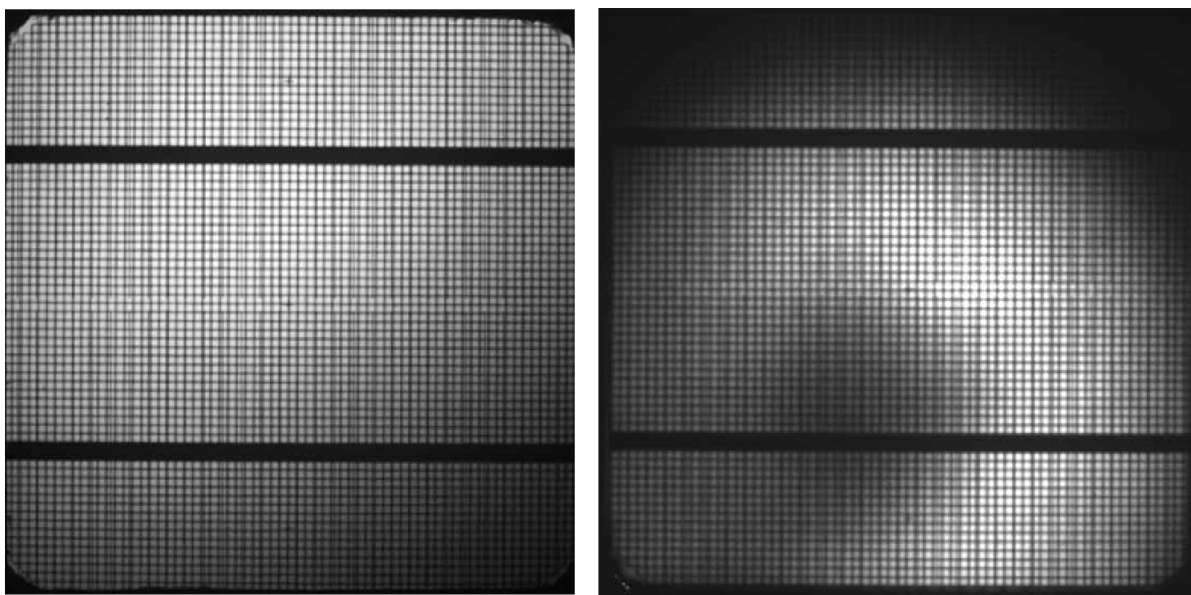
Použitý zdroj světla bohužel disponuje širokým světelným spektrem a CCD kamera snímá hlavně světlejší část spektra s malou hloubkou vniku do křemíkového materiálu. Z toho důvodu byl zapůjčen speciální UV zářič z laboratoře optoelektroniky Ústavu Mikroelektroniky, který generuje silný svazek UV záření. Doba expozice opět 10s, objektiv opatřen IR filtrem. Výsledný obraz bohužel nesplňoval očekávání (obr. 6.4). Stejně jako v předešlém měření se na obrázku vyskytovali pouze povrchové defekty s minimálním náznakem vírového defektu. Chyba je ve výrobě UV světelného zdroje, protože i v takovémto specializovaném zařízení dochází ke generaci slabého IR záření spolu se zářením UV.



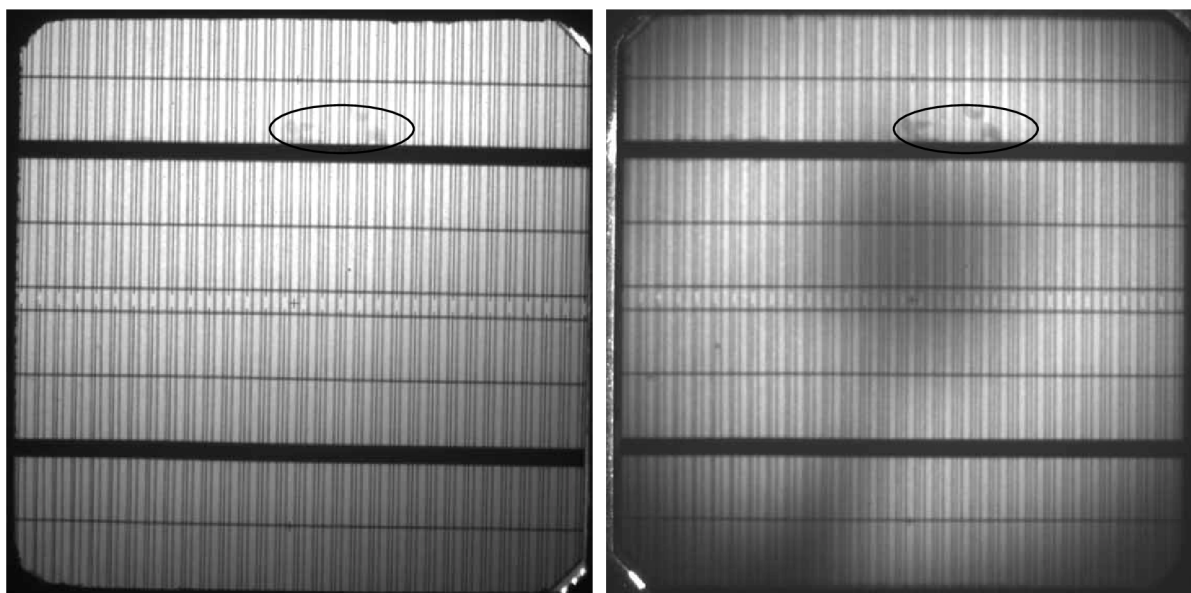
**Obr. 6.4: FTO-vz. A, Clear, 10s, IR filtr, speciální UV<sup>7</sup> zářič**

<sup>7</sup> UV zářič – speciální laboratorní zdroj s generací UV světla

Stejnými metodami byly změřeny i zbývající dva články vzoru B a C. Článek vzoru B (6.5 a,b) při použití speciálního UV zářiče je ovlivněn nesouvislým dopadem světla na plochu článku, kde v tmavších místech nedocházelo ke generaci nosičů náboje. Podle měření předešlých metod by zde měl být viditelný vírový defekt a neměly by být zjevné viditelné známky poškození povrchu.



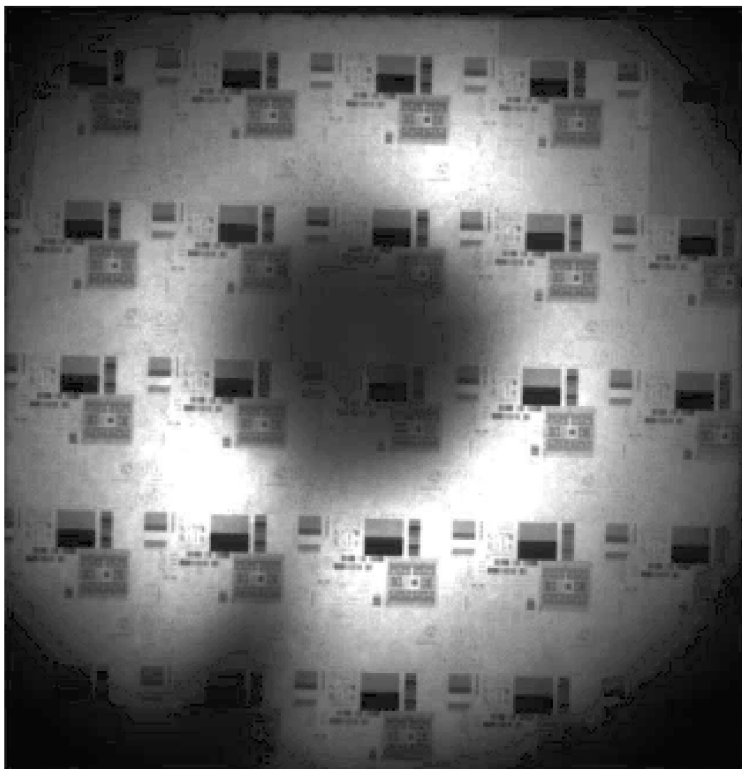
**Obr. 6.5: a)FTO-vz. B, Clear, 1s, 60V, IR b)FTO-vz. B, Clear, 1s, IR, UV zářič**



**Obr. 6.6: a)FTO-vz. C, Clear, 1s, 60V, IR b)FTO-vz. C, Clear, 1s, IR, UV zářič**

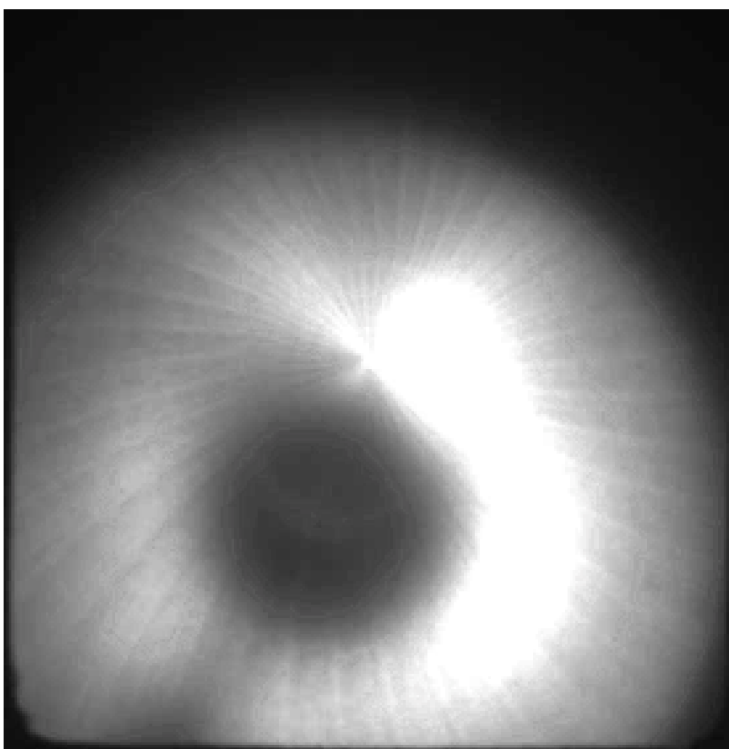
Článek vzoru C (obr. 6.6 a,b) má jinou strukturu mřížky a je zde vidět překrývání

spodní mřížky a vrchních vodících plošek článku. Tento jev je viditelný i u ostatních článků. Nehomogenita difúzní vrstvy se při měření neprojevila.



**Obr. 6.7: FTO-Monokr. s μčipy, Clear, 0,1s, IR,UV**

Při řešení problematiky funkčnosti měřící soustavy mi byly navíc poskytnuty 2 speciální čistě monokryst. křemíkové články bez vodících kontaktů a spodní Ag - Al mřížky s vrstvou mikročipů a bez této vrstvy. Články byly podrobeny měření pomocí FTO využitím UV filtru objektivu a UV zářiče. Na obr. 6.5 jsou jasně viditelné nanesené struktury mikročipů, tento článek byl podroben jiným měřením a nevykazoval žádné defekty.



**Obr. 6.8: FTO-Monokr. bez čipů, Clear, 0,1s, IR, UV zářič**

Na druhém monokrystalickém článku (obr. 6.8) jsou přesně viditelné stopy po rozřezávání článků na jednotlivé kusy vzniklé při výrobě článků z ingotu. Také zde nebyl použitým měřením FTO ani jinými měřícími metodami zjištěn defekt vnitřní nebo vnější vrstvy.

## 6.2 Řešení problematiky měření FTO

Odstranění problému hloubky vniku světelného záření a propuštění pouze UV složky na spodní část solárního článku je možné řešit pouze dvěma způsoby:

1. Zakoupením takového světelného zdroje, který bude 100% vyzařovat pouze UV světelné složky. Nutno podotknout, že pořizovací cena takto specializovaného zařízení se pohybuje v řádech několika desetitisíců korun.
2. Zakoupením speciálního filtru, který bude zabraňovat průniku IR záření na spodní část solárního článku. Tento filtr by se umístil mezi zrcadlo a článek. Filtry zmíněného typu se používají do drahých značkových digitálních fotoaparátů a zrcadlovek. Výroba tohoto filtru na zakázku pro naše potřeby měření v daných rozměrech pro 4 palcový článek 100x100 mm dle nabídky dodavatelské firmy by stála více než 10 000,-Kč.

Experimentální metoda měření fotoluminiscence pomocí zpětného transmisního osvětlení je vyvíjena pro rychlé testování solárních článků pro firmu SOLARTEC s.r.o., která se zabývá výrobou fotovoltaických křemíkových článků. SOLARTEC je zároveň investorem vývoje nových detekčních metod. Dle vyjádření firmy pro tento rok, zde již není prostor pro uvolnění dalších finančních prostředků na pokrytí výloh spojených s nákupem nových zařízení a doplňků.

## Závěr

V průmyslové výrobě solárních článků je nutné dbát na kvalitu, spolehlivost rentabilitu a účinnost fotovoltaických článků. Aby tyto podmínky byly splněny, je nutné výstupní produkty podrobovat testování, které odhalí vzniklé potíže článků a je možné díky tomu předejít problémům při prodeji koncovému uživateli nebo může dojít k odstranění problému již při procesu výroby. Pro testování solárních článků bylo vyvinuto několik detekčních metod, které v různých časových horizontech dokáží rozpoznat defekty článků.

V diplomové práci Fotoluminiscenční diagnostická metoda s transmisním osvětlením ve spolupráci s firmou SOLARTEC jsem se zabýval měřením různých typů monokrystalických solárních článků pomocí nově vyvinuté experimentální fotoluminiscenční metody diagnostiky s využitím zadního budícího zdroje osvětlení. Termín experimentální je použit v textu i v této části záměrně, protože metoda je založena na teoretických předpokladech o generaci volných nosičů náboje vlivem působení světelného toku na spodní stranu průmyslově vyráběných solárních článků. V České republice dosud neexistuje měřicí pracoviště využívajících podobných měřících technik. Diagnostická metoda je určena nejen pro vědecké účely měření v laboratořích, ale hlavně je využitelná v průmyslové výrobě křemíkových fotovoltaických článků firmou SOLARTEC s.r.o., protože díky rychlé detekci defektních oblastí článků je možné články zařadit do příslušných výkonnostních tříd nebo odhalit takový defekt, který je neslučitelný s distribucí měřeného kusu koncovým zákazníkům.

Pomocí stávajících měření na poskytnutých člancích byly nalezeny tři typy defektů a jsou popsány v uvedených metodách měření. Článek vzoru A obsahoval stopy mechanického poškození a slabý vírový defekt, článek vzoru B byl ovlivněn masivním vírovým defektem postupujícím od středu k okraji článku. Na článku vzoru C jsem zjistil defekty nehomogenity difúzní vrstvy patrné zejména okolo centrální oblasti článku. Solární články byly podrobeny analýze pomocí pomalých detailních měřících metod LBIV, LBIC a metod elektroluminiscence, fotoluminiscence, detekcí vad při záření mikroplazmy, které jsou určeny k rychlému zjištění vlastností vyrobených článků (měření probíhá několik sekund).

Vyvinutá experimentální metoda fotoluminiscence s transmisním osvětlením FTO splňuje částečně požadavky kladené na detekci defektů. Při měření článku vzoru A, byly potvrzeny povrchové defekty, ale vírový defekt byl potvrzen jen zčásti. Na článku vzoru B nebyly potvrzeny vírové defekty, ačkoliv pomocí měření jiných metod zde evidentně existují. Na článku typu C nebyla patrná nehomogenita difúzní vrstvy a to ze stejného důvodu jako absence vírových defektů ve variantě vzoru B, protože světelné záření snímané CCD kamerou je ovlivněna parazitním IR zářením, které překryje IR záření vytvořené fotoluminiscencí. Toto nelze za stávající situace popsané v kapitole 6.2 úspěšně vyřešit.

Při porovnání výsledků použitých měřících metod s inovovanou fotoluminiscenční metodou s transmisním osvětlením jsem dospěl k závěru, že díky omezeným finančním zdrojům potřebným k celkově funkčnímu měřicímu pracovišti je nutné pokračovat ve vývoji metody i nadále. Metoda spolehlivě odhalí povrchové defekty, které jsou lidským okem téměř nepozorovatelné, ale vnitřní defekty za současné situace nelze transparentně odhalit.

## Abecední seznam použitých zkratek

**CCD** - mikročip sloužící ke snímání obrazové informace (Charged Coupled Device)

**D-PREN** - typ teplotně odolného kabelu

**Elm** - zkratka pro měřící metodu elektroluminiscence

**FF** - faktor naplnění (FillFactor)

**Ftl** - zkratka pro měřící metodu fotoluminiscence

**FTO** - zkratka pro měřící metodu fotoluminiscence s transmisním osvětlením

**IP65** - třída určující ochranu proti vniknutí pevných těles a vody

**IR** - světelné záření s vlnovou délkou 760nm - 1mm (Infra Red)

**IR dioda** - svítící dioda založená na emitování infračerveného světla (Infra Red)

**L, N, PE** - označení fázového, středního a ochranného vodiče

**LBIC** – měřící diagnostická metoda využívající vlastnosti snímání proudu

**LBIV** - měřící diagnostická metoda využívající vlastnosti snímání napětí

**LED** - svítivá dioda (Light Emitting Diode)

**M63** - vývodka s metrickým závitem 63mm

**Mkp** - zkratka pro měřící metodu mikroplazmy

**PC** - počítač (Personal Computer)

**PG11** - typ vývodek se závitem M11

**PN přechod** - oblast spojení polovodičů typu P a N

**PVC** - látka, ze které je vyroben plastový materiál (Poly Vinyl Chlorid)

**RP-7494** - průmyslově vyrobený spínací programátor

**SCAME** - typ plastové krabičky

**ÚETE** - Ústav Elektrotechnologie

**USB** - univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)

**UV** - světelné záření s vlnovou délkou 200 - 400nm (Ultra Violet)



## Použitá literatura

- [1] BÍZEK V. a spol., *Encyklopedie Larousse*, Albatros, 1994, ISBN 80-00-00022
- [2] Obrázek Slunce [online].  
Dostupné z [www.gymfry.cz/zmp0304/augsten/next/slunce.htm](http://www.gymfry.cz/zmp0304/augsten/next/slunce.htm) [5. října 2008]
- [3] MARTIN JANDA, *Využití sluneční energie*, Časopis 21.Století, vydání Srpen 2008.
- [4] Laboratorní návod. Dostupné z  
[www.kfy.zcu.cz/prakt/Prakt\\_II/UF140/6/solar23.pdf](http://www.kfy.zcu.cz/prakt/Prakt_II/UF140/6/solar23.pdf) [15.ledna 2009]
- [5] PROF. ING. VÍTĚZSLAV BENDA, CSC, *Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky* [online]. Dostupné z  
[www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3553&h=13&pl=49](http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3553&h=13&pl=49) [10. května 2009]
- [6] PROTEXT, *Technický týdeník* [online]. Dostupné z  
[www.techtydenik.cz/tech\\_zpravy.php?id=3034](http://www.techtydenik.cz/tech_zpravy.php?id=3034) [14. listopadu 2008]
- [7] JAN HOŘČÍK, *Solární články se 40% účinností* [online]. Dostupné z  
[www.hybrid.cz/novinky/solarni-clanky-se-40-ucinnosti](http://www.hybrid.cz/novinky/solarni-clanky-se-40-ucinnosti) [18. ledna 2009]
- [8] MURTINGER K., BERANOVSKÝ J., *Fotovoltaika - elektřina ze slunce*, ERA, 2007, ISBN 978-80 -7366-100-7
- [9] HEGEDUS L., *Handbook of photovoltaic science and engineering*, Wiley, 2003, ISBN 0-471-49196-9
- [10] MORAVSKÉ PŘÍSTROJE, *Chlazená CCD kamera G2-3200* [online].  
Dostupné z <http://ccd.mii.cz/art?id=330&lang=405> [15. února 2009]
- [11] GM ELEKTRONIK, *Ventilátor SF230080AT-2082HSL(dsh.625-031.1)* [online].  
Dostupné z <http://www.gme.cz/cz/index.php?product=625-031>  
[20.dubna 2009]
- [12] VESELÝ, A.; VANĚK, J. *Použití fotoluminiscence při analýze fotovoltaických článků. In 3. České fotovoltaické konference, Sborník příspěvků. Rožnov pod Radhoštěm: Czech RE Agency, o.p.s, 2008. s. 155-156. ISBN: 978-80-254-3528-1.*  
[1.května 2009]

## Seznam obrázků

Obr. 1.1: Průřez jednotlivými vrstvami Slunce [2].....	11
Obr. 2.1: a) Monokrystalický článek , b) Amorfni článek.....	15
Obr. 2.2: Funkční struktura solárního článku.....	16
Obr. 2.3: V-A charakteristika solárního článku .....	17
Obr. 2.4: Náhradní elektrické schéma solárního článku [5].....	18
Obr. 3.1: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou LBIC .....	22
Obr. 3.2: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou Elektroluminiscence ...	23
Obr. 3.3: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou záření Mikroplazmy ...	24
Obr. 3.4: Struktura zapojení pracoviště pro měření metodou Fotoluminiscence .....	25
Obr. 3.5: Zářivé a nezářivé přechody mezi elektronově vibr. stavy složité molekuly .	27
Obr. 4.1:a) CCD kamera Kodak G2-3200 b) Spektrum snímaných vln. délek[10].....	29
Obr. 4.2: Software pro nastavování filtrů a expozice .....	29
Obr. 4.3: Struktura diagnostické metody s transmisním osvětlením.....	31
Obr. 4.4: Schéma stávajícího upraveného měřicího boxu .....	32
Obr. 4.5: Schéma rozebíratelného měřicího boxu .....	33
Obr. 4.6: Vrchní část rozebíratelného měřicího boxu .....	34
Obr. 4.7: Speciálně upravené zrcadlo pro potřeby měření .....	34
Obr. 4.8: Osvětlovací větraný box s mléčným sklem.....	35
Obr. 4.9: a) Soustava PVC trubek s ventilátorem b) Schéma ventilátoru [11] .....	36
Obr. 4.10: Spínací programátor s přepínači .....	37
Obr. 4.11: Schéma elektrické propojovací výbavy.....	40
Obr. 5.1: a) LBIC-vz. A, LED červená b)LBIC-vz. A, IR dioda .....	41
Obr. 5.2: LBIV-vz. A, IR dioda .....	41
Obr. 5.3: a) LBIC-vz. B, LED zelená b)LBIC-vz. B, IR dioda .....	42
Obr. 5.4: LBIV-vz. B, IR dioda .....	42
Obr. 5.5: a) LBIC-vz. C, LED modrá b)LBIC-vz. C, UV dioda .....	43
Obr. 5.6: LBIV-vz. C, LED zelená.....	43
Obr. 5.7: a) Elm - vz. A, IR, 20s, 3A, 1,4V b) Elm - vz. B, IR, 20s, 2,5A, 1,4V.....	44
Obr. 5.8: Elm – vz. C, IR, 20s, 3A, 1,4V .....	44
Obr. 5.9:a) Ftl - vz. A, IR, 10s, UV LED 24V b) Ftl - vz. B, IR, 10s, UV LED 24V...	45
Obr. 5.10: Ftl - vz. C, IR, 10s, UV LED 24V.....	45
Obr. 5.11: a) Mkp-vz. A, IR, 20s, 8V, 650mA b) Mkp-vz. B, IR, 20s, 6V, 120mA .....	46

Obr. 5.12: Mkp - vz. C, IR, 20s, 6V, 260mA .....	46
Obr. 6.1: a) FTO-vz. A, Clear, 10s, 220V b) FTO-vz. A, Clear, 0,1s, 220V .....	48
Obr. 6.2: FTO-vz. A, Clear, 10s, 60V.....	48
Obr. 6.3: a) FTO-vz. A, Clear, 10s, 60V, IR b) FTO-vz. A, Clear, 0,1s, 60V, IR .....	49
Obr. 6.4: FTO-vz. A, Clear, 10s, IR filtr, speciální UV.....	50
Obr. 6.5: a)FTO-vz. B, Clear, 1s, 60V, IR b)FTO-vz. B, Clear, 1s, IR, UV zářič.....	51
Obr. 6.6: a)FTO-vz. C, Clear, 1s, 60V, IR b)FTO-vz. C, Clear, 1s, IR, UV zářič.....	51
Obr. 6.7:FTO-Monokr. s μčipy, Clear, 0,1s, IR,UV .....	52
Obr. 6.8: FTO-Monokr. bez čipů, Clear, 0,1s, IR, UV zářič.....	52

## **Seznam příloh**

### **A) Montážní výkresová dokumentace**

Příloha 1: Hlavní měřicí box

Příloha 2: Rozebíratelný měřicí box

Příloha 3: Vrchní část rozebíratelného měřicího boxu

Příloha 4: Osvětlovací box

Příloha 5: Spínací programátor

### **B) Fotografie vyrobených částí měřicího pracoviště**

Příloha 6: Foto hlavního měřicího boxu

Příloha 7: Foto rozebíratelného boxu s odnímatelnou vrchní částí

Příloha 8: Foto osvětlovacího boxu

Příloha 9: Foto spínacího programátoru v krabičce SCAME