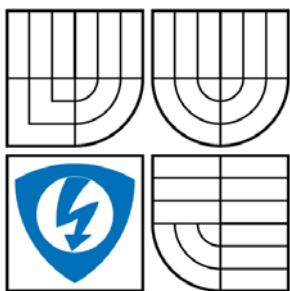


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

# CHARAKTERIZACE ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ POMOCÍ CCD KAMERY

CHARACTERISATION SOLAR CELL ELECTRIC PROPERTIES BY CCD CAMERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PATRIK STEINER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Patrik Steiner  
Bytem: Jiráskova 14, Bruntál, 79201  
Narozen/a (datum a místo): 9.7.1983 v Bruntále

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc. Ing. Marie Sedlaříková, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

|                         |                                                                           |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Název VŠKP:             | Charakterizace elektrických vlastností solárních článků pomocí CCD kamery |
| Vedoucí/ školitel VŠKP: | Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.                                                    |
| Ústav:                  | Ústav elektrotechnologie                                                  |
| Datum obhajoby VŠKP:    | 11.6.2008                                                                 |

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- |                                             |   |                 |   |
|---------------------------------------------|---|-----------------|---|
| <input type="checkbox"/> tištěné formě      | – | počet exemplářů | 2 |
| <input type="checkbox"/> elektronické formě | – | počet exemplářů | 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.

3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT:**

Cílem této diplomové práce je charakterizace elektrických vlastností solárních článků pomocí CCD kamery. Diagnostické metody jsou založené na elektroluminiscenci a mikropasmě vyzařované z povrchu solárního článku. Získané výsledky jsou následně porovnány s metodou LBIC (Light Beam Induced Current) a popsány jednotlivé defekty při průmyslové výrobě.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Elektroluminiscence, mikroplasma, LBIC, CCD

## **ABSTRACT:**

The aim of this thesis is the characterization of electrical properties of solar cell using CCD camera. Diagnostic methods are based on electroluminescence and microplasma emitted from the surface of the solar cell. The results are then compared with the method LBIC (Light Beam Induced Current) and described the various defects in industrial production.

## **KEY WORDS:**

Electroluminescence, microplasma, LBIC, CCD

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE:**

STEINER, P. *Charakterizace elektrických vlastností solárních článků pomocí CCD kamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Charakterizace elektrických vlastností solárních článků pomocí CCD kamery” zpracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Vaňka Ph.D, s použitím literárních pramenů a publikací, které jsem všechny uvedl v seznamu literatury. Jsem si vědom, že na vytvořenou práci se vztahují práva a povinnosti vyplývající z autorského zákona (zák. č. 121/2000 Sb.).

V Brně dne .....

.....

podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Vaňkovi, PhD. za účinnou metodickou, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Taktéž děkuji firmě Solartec, s.r.o. za poskytnutí solárních článků a za jejich spolupráci.

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD.....</b>                                                | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>ZÁKLADNÍ POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY PRO SOLÁRNÍ ČLÁNKY .....</b> | <b>10</b> |
| 2.1      | KŘEMÍK (Si) .....                                               | 11        |
| 2.2      | VÝROBA MONOKRYSTALICKÉHO SOLÁRNÍHO ČLÁNKU .....                 | 11        |
| <b>3</b> | <b>METODY PRO ANALÝZU SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ .....</b>                | <b>13</b> |
| 3.1      | SLUNEČNÍ SIMULÁTORY (SOLAR SIMULATORS) .....                    | 13        |
| 3.1.1    | <i>Elektrické parametry solárních článků.....</i>               | <i>14</i> |
| 3.2      | DIAGNOSTICKÉ METODY PŘI VÝROBĚ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ.....            | 17        |
| 3.2.1    | <i>Elektroluminiscence.....</i>                                 | <i>17</i> |
| 3.2.2    | <i>Mikroplasma.....</i>                                         | <i>18</i> |
| 3.2.3    | <i>LBIC (Light Beam Induced Current) .....</i>                  | <i>19</i> |
| 3.2.4    | <i>LBIV (Light Beam Induced Voltage) .....</i>                  | <i>20</i> |
| 3.2.5    | <i>EBIC (Electron Beam Induced Voltage).....</i>                | <i>21</i> |
| 3.2.6    | <i>ILIT (IR Thermography).....</i>                              | <i>21</i> |
| <b>4</b> | <b>KRYOGENNÍ TECHNIKA.....</b>                                  | <b>23</b> |
| 4.1      | VLASTNOSTI KRYOGENNÍCH LÁTEK .....                              | 23        |
| 4.2      | VLASTNOSTI DUSÍKU .....                                         | 24        |
| 4.3      | TEPELNÁ IZOLACE.....                                            | 24        |
| 4.4      | VLASTNOSTI PEVNÝCH LÁTEK ZA NÍZKÝCH TEPLOT .....                | 25        |
| 4.4.1    | <i>Elektrická vodivost .....</i>                                | <i>25</i> |
| 4.4.2    | <i>Tepelná vodivost .....</i>                                   | <i>28</i> |
| 4.4.3    | <i>Tepelná roztažnost.....</i>                                  | <i>28</i> |
| <b>5</b> | <b>CCD TECHNOLOGIE .....</b>                                    | <b>30</b> |
| 5.1      | SNÍMÁNÍ OBRAZU .....                                            | 30        |
| 5.2      | CHYBY PŘI SNÍMANÍ CCD .....                                     | 32        |
| 5.2.1    | <i>Dynamický rozsah.....</i>                                    | <i>32</i> |
| 5.2.2    | <i>Šum .....</i>                                                | <i>33</i> |
| 5.2.3    | <i>Vinětace .....</i>                                           | <i>34</i> |
| 5.2.4    | <i>Blooming.....</i>                                            | <i>34</i> |
| <b>6</b> | <b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>                                     | <b>35</b> |
| 6.1      | NÁVRH MĚŘICÍHO PRACOVÍŠTĚ .....                                 | 35        |
| 6.2      | PRŮMYSLOVÁ CCD KAMERA .....                                     | 36        |
| 6.3      | TEMNÁ KOMORA .....                                              | 38        |
| 6.4      | KONTAKTNÍ POLE.....                                             | 40        |
| 6.5      | VLASTNÍ MĚŘENÍ.....                                             | 42        |
| 6.6      | NAMĚŘENÉ DEFEKTY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ .....                         | 44        |
| <b>7</b> | <b>ZÁVĚR .....</b>                                              | <b>51</b> |
| <b>8</b> | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                          | <b>53</b> |
| <b>9</b> | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>                           | <b>54</b> |

# 1 Úvod

Fotovoltaika se řadí mezi obnovitelné zdroje energie (OZE) a v dnešní době patří mezi nejrychleji rostoucí oblasti této výroby.

Jde o technický obor, který se zabývá procesem přímé přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Název je odvozen od slova foto (světlo) a volt (jednotka elektrického napětí). Proces přeměny probíhá ve fotovoltaickém neboli solárním článku.

Jde o aplikaci fotoelektrického jevu, při němž dopadem fotonů na polovodičový PN přechod dochází k hromadění volných elektronů a vynikají páry elektron-díra, které generují elektrický proud. Základy objevil Alexander Edmond Becquerel v roce 1839. V roce 1958 se poprvé použilo solárních článků pro výrobu energie v kosmických programech a od té doby se staly jejich nedílnou součástí.

Postupným zaváděním výroby křemíkových článků (multikrystalické, polykrystalické a monokrystalické) došlo k rozšíření využití i pro civilní sféru, kde se nyní pohybuje účinnost kolem 18%. V následujících letech by se mělo postupně přejít na tenkovrstvé (thin films) solární články s odhadovaným zastoupením na přelomu roku 2010-2011 okolo 25%. [2]

U téměř nevyčerpatelné sluneční energie se dá předpokládat, že solární, ale i jiné obnovitelné zdroje energie budou mít v budoucnu výrazný podíl na celosvětové produkci a na postupném vytlačování výroby energie z fosilních paliv, která se v dnešní době pohybuje kolem 84 %. [1][2]

Diplomová práce se zabývá charakterizací solárních článků metodou elektroluminiscence a mikroplazmy pomocí CCD kamery a následným srovnáním s jinou metodou. První část práce je zaměřena na teoretické poznatky, funkci a princip činnosti CCD kamer, popis jednotlivých diagnostických metod používaných pro detekci materiálových a procesních defektů na solárních článcích. Ve druhé části práce je navrženo měřicí pracoviště pro metodu elektroluminiscence a mikroplazmy, které bylo použito pro měření. V poslední části práce jsou shrnuty a popsány naměřené defekty a následně porovnány s metodou proudové mapy solárního článku, tzv. metoda LBIC (Light Beam Induced Current).

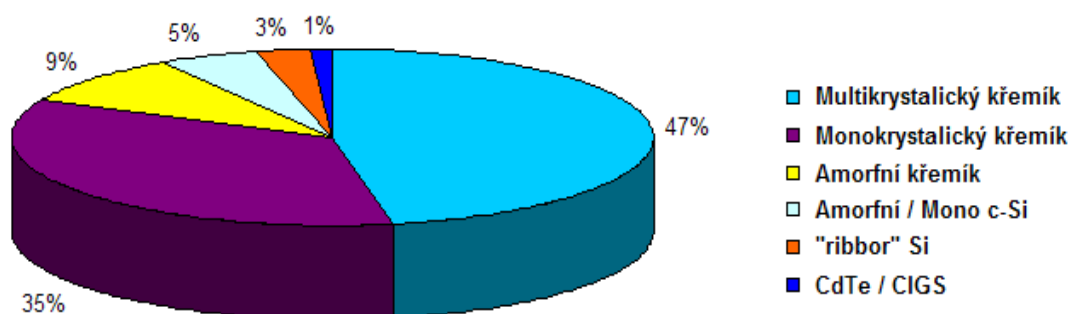
## 2 Základní polovodičové materiály pro solární články

O účinnosti, a tedy i o výkonu solárního panelu, rozhodují vlastnosti solárních fotovoltaických článků, které jsou vyrobeny z polovodičových materiálů. O vhodnosti polovodičových materiálů pro použití v solárních článcích rozhoduje šířka zakázaného pásu energie pro daný materiál. Tato hodnota by měla ležet v rozmezí od 1,1 eV do 1,7 eV, kdy za ideální hodnotu  $E_g$  se považuje hodnota 1,5 eV. Vyžaduje se také, aby se použité materiály vyznačovaly vysokou pohyblivostí a dlouhou dobou života minoritních nosičů náboje. Existuje mnoho polovodičových materiálů, které splňují uvedené požadavky. Jsou to zejména Si, GaAs, CdTe, CuInSe<sub>2</sub> (CIS), CdSe, InP, AlSb, GaAlAs a další.

Podle výzkumu bylo v roce 2004 dosaženo extrémně vysokého nárůstu fotovoltaického průmyslu, který způsobil nedostatek zásob křemíku jako výchozího materiálu pro výrobu solárních panelů. Následkem toho je v současnosti kladen vysoký důraz na:

- vysoký nárůst výroby křemíku;
- vstup nových technologií pro výrobu solárních článků na bázi tenkých vrstev;
- zvýšení výtěžnosti křemíku;
- omezení materiálové ztráty, zvýšení účinnosti;
- zavedení širší výroby tenkovrstvých fotovoltaických technologií
- ekologii výroby.

V roce 2006 byl na trhu výroby v popředí multikrystalický křemík, který byl těsně následován monokrystalickým křemíkem. Ostatně na obr. 2.1 je uvedeno procentuální zastoupení materiálů pro fotovoltaický průmysl.



Obr. 2.1: Procentuální zastoupení materiálů pro fotovoltaický průmysl

## 2.1 Křemík (Si)

První solární články byly vyrobeny z křemíku, který zůstal i v současné době nejvýznamnějším materiálem pro jejich výrobu a toto své postavení si zřejmě i udrží. Prvotně byl využíván monokrystalický křemík. Na základě výzkumných prací se na začátku 80. let objevily první solární články z multikrystalického křemíku (polykrystalický s velkými krystaly), který je vhodnější pro menší výkony. Hlavní výhodou je poměrně dobrá účinnost i při nižších hladinách osvětlení. Multikrystalické články vykazují nižší účinnost, danou především ztrátami velikosti zrn krystalu. Proto se výrobci snaží zhotovovat multikrystalický křemík s co největšími krystaly nebo vyrábět monokrystalický, který jsme používali pro naše účely.

## 2.2 Výroba monokrystalického solárního článku

Základním materiálem pro monokrystalické články je vypěstovaná tavenina očkovacího krystalu pomocí Czochralského metody. Výsledný ingot je nařezán na jednotlivé plátky, neboli wafery, které se dále upravují v pracovním kroku.

Při prvním kroku se plátky polovodiče typu P odleptávají mokrou chemickou cestou o několik mikrometrů pomocí bóru, přičemž zároveň dochází k zarovnání poškozené vrstvy při řezání.

Následujícím krokem je difúze ve vyhřívané peci při teplotě  $+800^{\circ}\text{C}$ , kdy se dostává do povrchové vrstvy fosfor z nosného plynu a dochází ke vzniku N vrstvy. Poté se plátky poskládají do kostky a nechají na sebe působit kyslíkovou plazmu o vysokém kmitočtu, která izoluje N vrstvu na hranách.

Pro zvýšení účinnosti článku dochází k deponování antireflexní vrstvy nitridem křemíku, který způsobuje namodralou barvu povrchu solárního článku.

Nyní se natiskne na zadní stranu celoplošný kontakt z vodivého stříbra s příměsí hliníku metodou sítotisku. Následuje tisk přední strany, která slouží jako kontaktní plocha. Všechny vrstvy se poté spékají při vysoké teplotě, kdy obsažený hliník v pastě proniká skrz N vrstvu a mění ji na typ P.

U výsledného článku se provádí měření elektrických vlastností a následné rozdělení do tříd podle účinnosti. [3]

### 3 Metody pro analýzu solárních článků

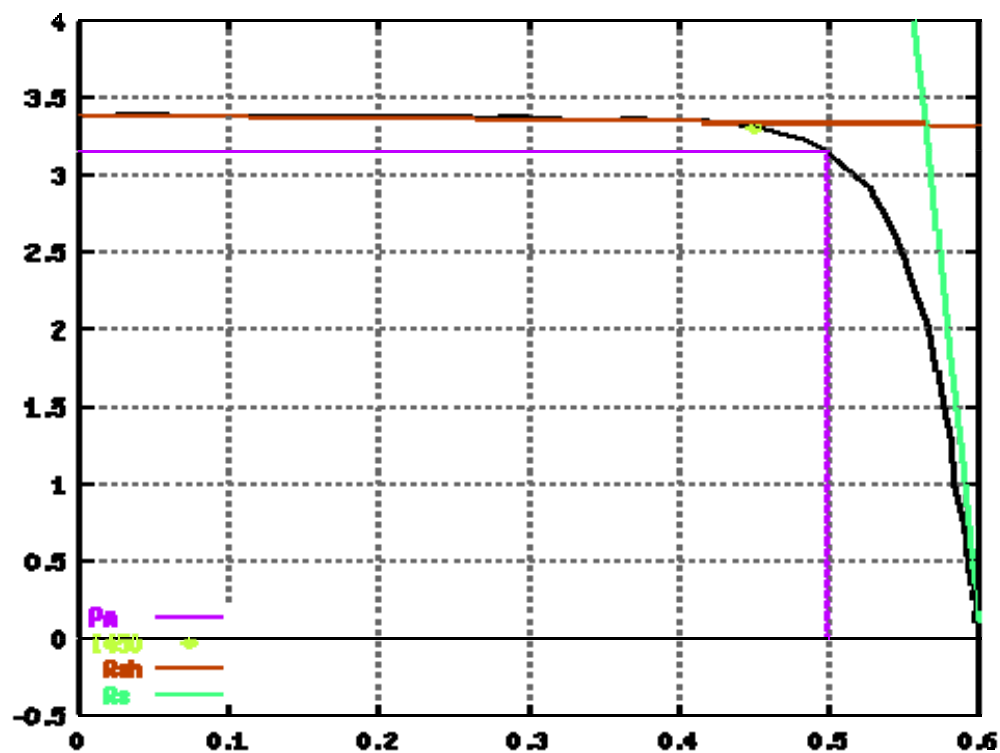
Metody se používají pro určování vlastností a parametrů solárních článků při výstupním procesu výroby. Patří mezi nejdůležitější parametry, které určují jmenovitý výkon každého vyrobeného solárního článku, který se následně rozděluje do výkonnostních tříd. Metody můžeme rozdělit do dvou skupin:

- pro měření elektrických parametrů solárních článků pomocí slunečních simulátorů,
- diagnostické metody při výrobě solárních článků.

#### 3.1 Sluneční simulátory (*solar simulators*)

Jedná se o speciálně vyvinuté zdroje světla, které mají za úkol co nejpřesněji simulovat spektrum slunečního záření po celém jeho rozsahu. Jako zdroj bodového světla se nejčastěji používá xenonová výbojka, případně halogenidová HQI, protože se nejvíce blíží k spektru slunečního světla. Vytvářejí pomocí optických systémů homogenní svazek rovnoběžných paprsků, které dopadají kolmo na osvětlovaný solární článek.

Tyto simulátory musí splňovat mnoho mezinárodních standardů, zejména ASTM 927-91, IEC 904-9 nebo JISC C 8912, aby výstupní hodnoty byly referenční a uznávané. Jedná se o záření o intenzitě  $1000 \text{ W/m}^2$  neboli 1 SUN, které odpovídá spektru AM-1.5 slunečního záření. Měření probíhá při konstantní teplotě  $25^\circ\text{C}$ . Na základě tohoto změření lze velice rychle (řádově v sekundách) analyzovat elektrické parametry solárních článků a pomocí firemního programu (obr. 3.1) články třídit do jednotlivých výkonnostních tříd. [4][5]



Obr. 3.1: U-I charakteristika pomocí slunečního simulátoru

### 3.1.1 Elektrické parametry solárních článků

- Zkratový proud  $I_{SC}$ , neboli proud nakrátko  
Proud tekoucí článkem při napětí  $U = 0$  V.
- Napětí otevřeného obvodu  $U_{OC}$ , neboli napětí naprázdno  
Napětí solárního článku bez připojené zátěže.
- Maximální proud  $I_{PM}$   
Proud, při kterém solární článek dodává největší výkon.
- Maximální napětí  $U_{PM}$   
Napětí, při kterém solární článek dodává největší výkon.

- Ideální sluneční výkon  $P_O$

Teoretický maximální výkon solárního článku, dán součinem proudu nakrátko a napětí naprázdno podle vztahu (3.1).

$$P_O = U_{OC} \cdot I_{SC} \quad (3.1)$$

- Maximální výkon  $P_M$

Největší výkon, který je článek schopen dodávat a který je dán součinem maximálního napětí a proudu podle vztahu (3.2). Při návrhu fotovoltaického systému je dobré dbát na tento bod MPP (Maximum Power Point) ve U-I charakteristice kvůli maximální efektivnosti využití článku, viz obr. 3.2.

$$P_M = U_{PM} \cdot I_{PM} \quad (3.2)$$

- Sériový odpor  $R_S$

Jedná se o parazitní nežádoucí odpor, který vzniká na přechodu kov – kov, kov – polovodič a ve vnitřní struktuře substrátu solárního článku.

- Paralelní odpor  $R_{SH}$

Jde o paralelní kombinaci odporového bočníku  $R_T$  a dynamického odporu  $R_D$ . Obvykle hodnota  $R_T$  je velmi velká vůči  $R_D$  při svorkovém napětí. Z toho důvodu je paralelní odpor přibližně roven  $R_D$ .

- Charakteristický odpor  $R_{CH}$

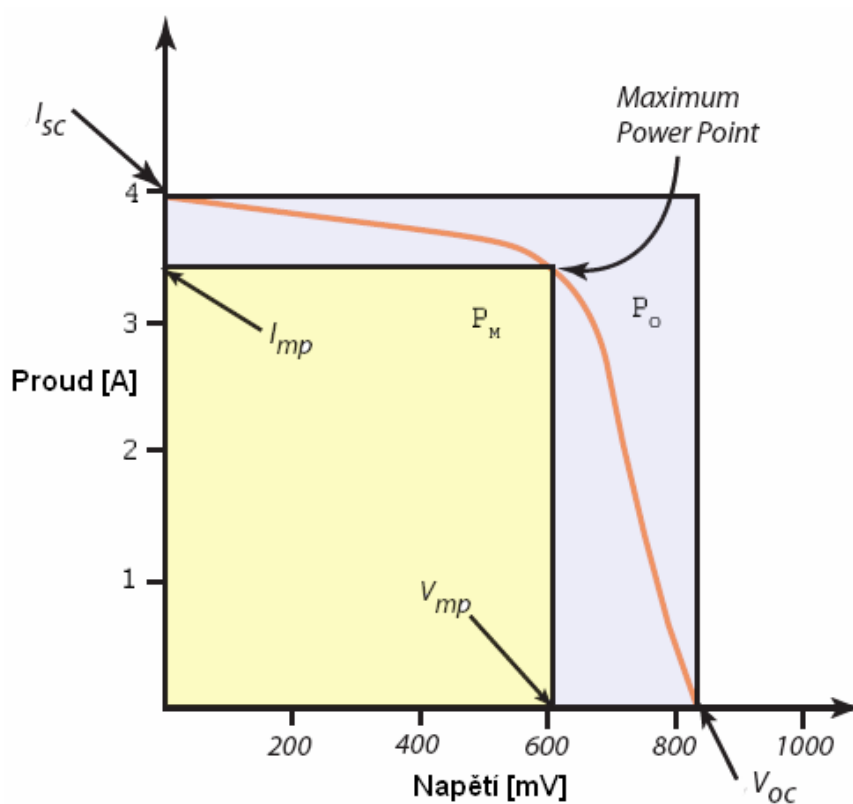
Odpor, daný podílem napětí otevřeného obvodu a zkratovým proudem podle vztahu (3.3).

$$R_{CH} = \frac{U_{OC}}{I_{SC}} \quad (3.3)$$

- Činitel plnění FF (Fill Factor)

Jedná se o poměr v procentech (3.4) mezi maximálním výkonem a ideálním slunečním výkonem. Grafické znázornění viz obr. 3.2.

$$FF = \frac{U_{PM} \cdot I_{PM}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100 = \frac{P_M}{P_O} \quad (3.4)$$



Obr. 3.2: U-I charakteristika solárního článku

- Účinnost solárních článků

Udává procentuální účinnost solárního článku na vyzařované sluneční spektrum. Typická účinnost u solárních článků je 15 – 20 %, podle typu výkonnostní třídy.

### **3.2 Diagnostické metody při výrobě solárních článků**

Charakteristické techniky, které poskytují informaci o solárních článcích jsou neocenitelnou pomůckou pro sledování výrobního procesu a při vývoji nových článků a jejich zdokonalování. Důležitou vlastností je časová nenáročnost, aby mohla být daná metoda použita v line-in výrobním procesu.

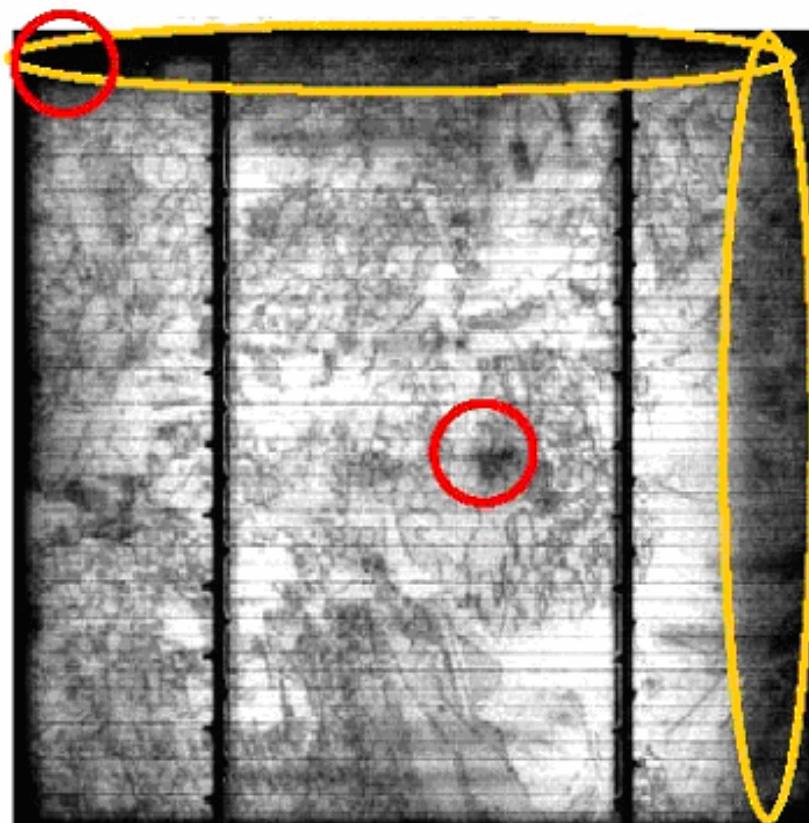
#### **3.2.1 Elektroluminiscence**

Jedná se o děj, při němž elektrony přeskakují z vyšší energetické hladiny do nižší, což vyvolá vznik elektromagnetického záření, tedy vznik fotonu. Platí zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti rekombinujících párů elektron-díra. Energie fotonu je dána vzorcem (3.5), kde  $h$  je planckova konstanta  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$  a  $f$  = frekvence vlnění.

$$E = h \cdot f \quad (3.5)$$

Měření se provádí vybuzením fotonů přiloženým elektrickým polem, kdy se do solárního článku použije jmenovité stejnosměrné napětí a proud z regulovatelného zdroje v propustném směru při absolutní tmě. Výsledná luminiscence se snímá elektronickým senzorem citlivým na světlo, např. CCD nebo CMOS [6].

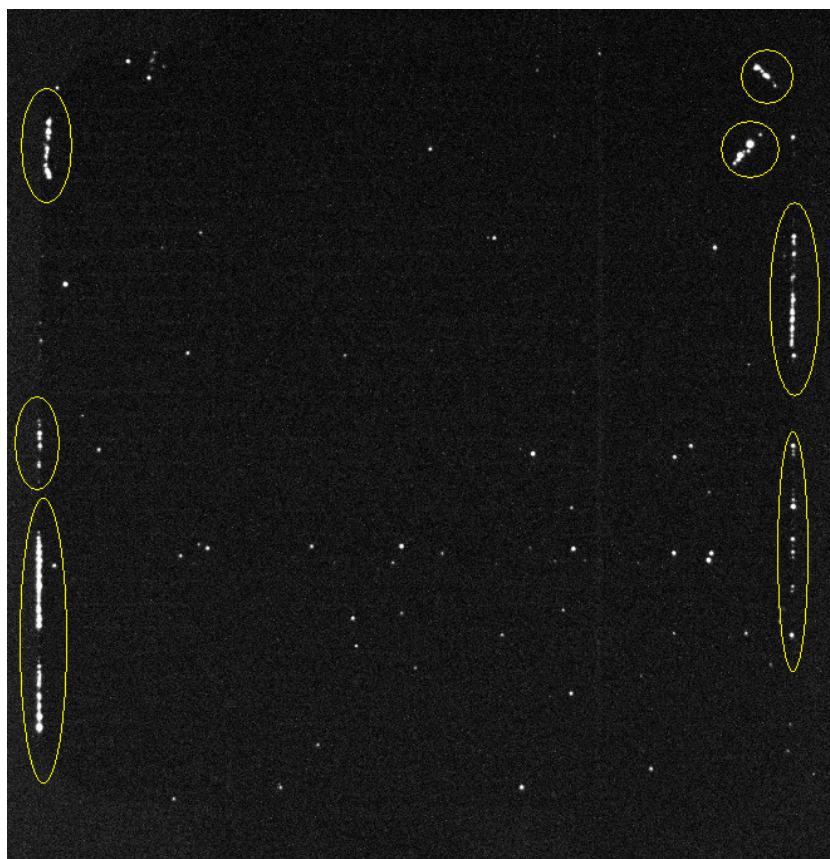
Pomocí elektroluminiscence můžeme velmi rychle a přesně charakterizovat elektrické, optické vlastnosti a také materiálové nerovnosti, či vady solárního článku, viz obr. 3.3.



Obr. 3.3: Metoda elektroluminiscence

### 3.2.2 Mikroplasma

Mikroplasma je obdobná metoda měření defektů a vad (obr. 3.4) u solárních článků, jako metoda elektroluminiscence, s tím rozdílem, že se zde používá měření článku v závěrném směru, tedy je připojen regulovatelný zdroj napětí s opačnou polaritou. Světla místa na obr. 3.4 jsou způsobena poruchami v PN přechodu, kde dochází vlivem poškození krystalické mřížky k lokálnímu lavinovému výboji, který vyvolává emisi světla. Je důležité nepřekročit hranici lavinového průrazu, který by způsobil trvalé poškození daného místa. Mezi nejčastější příčiny vzniku těchto defektů patří špatné zabroušení, případně porušení hran při výrobě (žlutá barva) nebo materiálové trhliny a mikroškrábance na povrchu solárního článku.



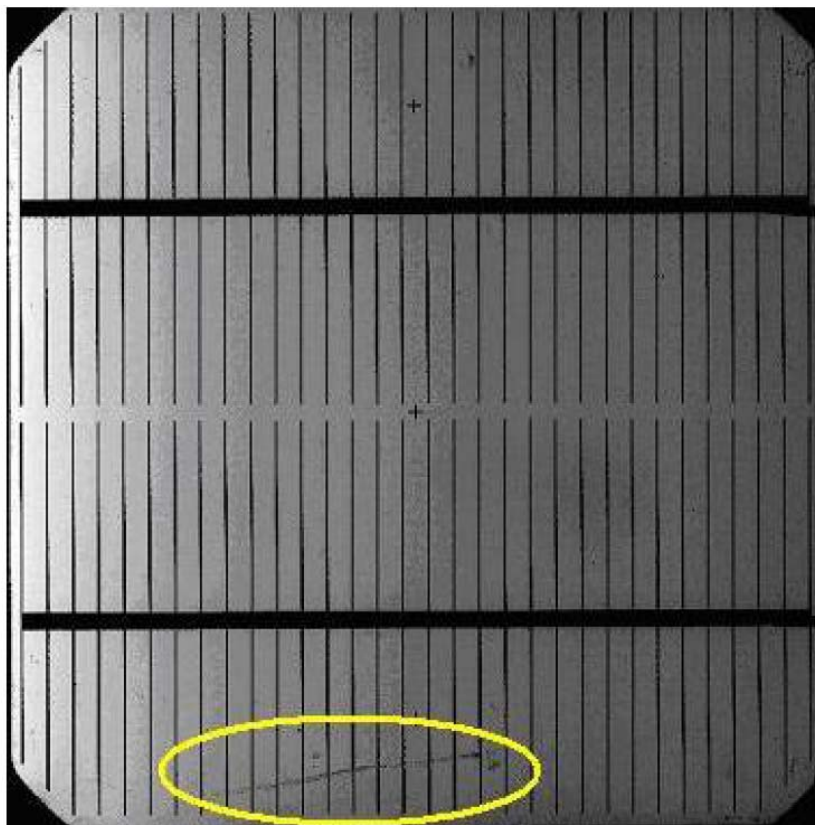
Obr. 3.4: Metoda mikroplazmy

### 3.2.3 LBIC (Light Beam Induced Current)

Jde o metodu založenou na indukování proudu na solárním článku pomocí fokusovaného světla, kterým postupně rastrujeme článek v osách XY. Při osvětlení bodu solárního článku dojde k proudové odezvě. Postupným snímáním bod po bodu získáme kompletní proudovou mapu solárního článku. Jako zdroj bodového světla se používají LED diody s různou vlnovou délkou a nízkým rozptylem paprsků nebo laserové diody. Důležitým parametrem při snímání proudové mapy je rychlost kroku rastrovacího zařízení a jeho rozlišovací schopnost, která se udává ve vzdálenosti jednoho kroku motoru. Dalším důležitým parametrem je velikost fokusovaného paprsku v místě dopadu na solární článek, kdy za optimální se považuje právě velikost jedné délky kroku rastrovacího zařízení. Dále intenzita dopadajícího záření, kdy při velké intenzitě může dojít k přebuzení indukovaného proudu a

následné vzorkování proudu povede k vysokému kontrastu, což má za následek zesvětlení proudové mapy.

Pomocí metody LBIC můžeme z výsledné mapy (obr. 3.5) analyzovat jednotlivé výrobní defekty, ale také povrchové defekty způsobené špatnou manipulací při a po výrobě. Nevýhodou metody je dlouhá doba rastrování solárního článku (v řádu několika hodin). [7]



Obr. 3.5: Metoda LBIC (Light Beam Induced Current) [7]

#### 3.2.4 LBIV (Light Beam Induced Voltage)

Jedná se o podobnou metodu jako LBIC, která slouží k zjišťování defektů pomocí lokálního ozáření monochromatickým světlem s různou vlnovou délkou. Výsledkem u této metody je naopak napěťová mapa. Postup snímání povrchu solárního článku je stejný jako u metody LBIC. [8]

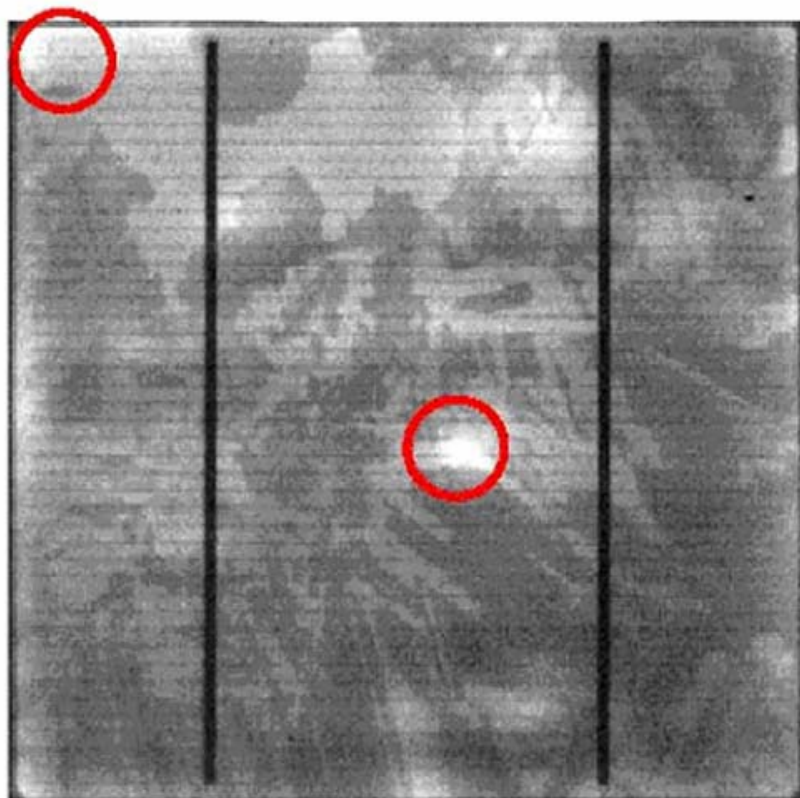
### **3.2.5 EBIC (Electron Beam Induced Voltage)**

Metoda EBIC se zabývá charakterizací solárních článků na principu odezvy ozáření povrchu solárního článku fokusovaným elektronovým svazkem, kdy jsou následně v polovodiči generovány rekombinace elektron – díra. Generování párů probíhá v PN přechodu nebo v difúzní vrstvě. Díky elektrostatickému potenciálu přechodu polovodiče dochází k separaci a tím je vyvolán vnější proud a napětí. Při dostatečném zesílení tohoto výstupního signálu získáme informace o elektrických vlastnostech PN přechodu, ale také můžeme určit rychlost rekombinace částic, dobu života nosičů elektrického náboje, difúzní délku a šířku depletiční vrstvy.

Díky vlastnostem elektronového svazku a jeho rozlišovací schopnosti můžeme detailně zkoumat materiálovou strukturu článku na mikroskopické úrovni. [7]

### **3.2.6 ILIT (IR Thermography)**

Měření se provádí pomocí koncentrace nadbytečných generovaných světelných nosičů skrze volné absorpční pole nebo přes vyzařovací infračervené IR nosiče, které jsou posléze detekovány na citlivé infračervené kameře. Výsledkem je obraz na obr. 3.6. [6]



Obr. 3.6: Metoda ILIT (IR Thermography)

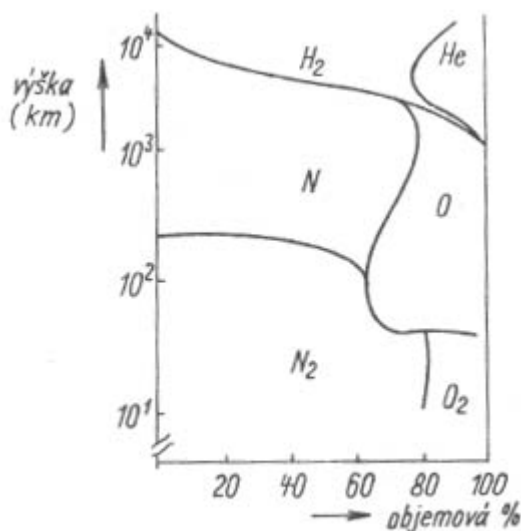
## 4 Kryogenní technika

V elektrotechnice se využívá kryotechnika pro ochlazení vodičů, polovodičů, v důsledku snížení jejich elektrického odporu, který dosahuje v závislosti na teplotě a čistotě až několik řádů (hypervodivost), u řady látek dojde dokonce k úplnému vymizení odporu (supravodivost). Stejnoseměrné proudy supravodiče přenášejí bezztrátově, střídavé proudy způsobují u supravodičů malé hysterézní ztráty.

Ochlazení prvků měřicích a telekomunikačních zařízení vede ke snížení šumu a následné zvýšení citlivosti. [9]

### 4.1 Vlastnosti kryogenních látek

Plyny, které se používají v kryotechnice jsou nejčastěji obsažené v zemské atmosféře. Složení vzduchu (obr. 4.1) se ve velkých výškách nad povrchem země značně mění. Hlavní složky  $N_2$ ,  $O_2$  se z molekulární formy mění na jednoatomové, přibývá  $H_2$  a ve výškách nad 500 km je země obklopena vrstvou plynného  $^4He$ , kdy tato vrstva zasahuje až do výše 5000 km v závislosti na sluneční aktivitě.



Obr. 4.1: Složení vzduchu v zemské atmosféře

Nejčastěji používané látky v kryotechnice jsou vzduch, kyslík, dusík, argon, krypton, xenon, neon, vodík a hélium. Pro naše měřicí účely budeme používat kapalný dusík, který má označení LN<sub>2</sub>. [9]

## **4.2 Vlastnosti dusíku**

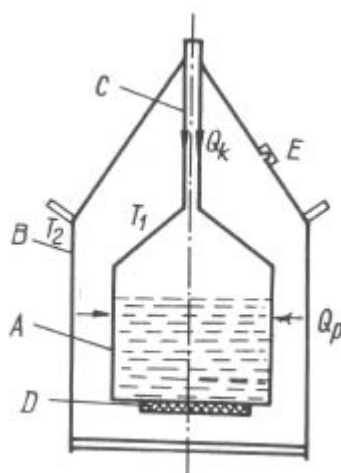
Dusík má atomové číslo 7, hmotnostní číslo 14,0075 a nejčastějším izotopem je <sup>14</sup>N (99,62 %), další stabilní izotop <sup>15</sup>N je zastoupen v poměru 3,8.10<sup>-3</sup>. Objemové složení dusíku v suchém vzduchu na úrovni moře je 78,085 % a hmotnostní 75,52 % při parciálním tlaku 7,86.104 Pa. Kapalný dusík LN<sub>2</sub> s normálním bodem varu 77,35 K (-196°C) má hustotu 804 kg.m<sup>-3</sup> a výparné teplo 199 kJ.kg<sup>-1</sup>. Získává se separací vzduchu v průmyslovém měřítku podobně jako kyslík. Vyrábí se v průmyslových velkokapacitních stanicích nebo menších laboratorních zkapalňovačích.

LN<sub>2</sub> je bezbarvý, lehčí než voda a z hlediska vzniku výbuchu je na rozdíl od kapalného kyslíku LO<sub>2</sub> bezpečný. Není jedovatý ani chemicky aktivní. Široké technické využívání LN<sub>2</sub> je podmíněno jeho příznivými fyzikálními vlastnostmi a poměrně nízkou pořizovací cenou. [9]

## **4.3 Tepelná izolace**

Tepelnými izolacemi se rozumějí prostředky, které omezují přenos tepla z teplejších těles do chladnějších. Mezi základní problémy tepelné izolace v kryotechnice patří problém omezení tepelného toku mezi stěnou na pokojové teplotě a stěnou na teplotě kryokapaliny, která je přechovávána při teplotě normálního bodu varu, tedy pro kapalný dusík 77,35 K. Problémy tepelné izolace vyřešil James Dewar, který na konci 19.století vynalezl dewarovu nádobu. Dewarovy nádoby, zkráceně dewarky (obr. 4.2) jsou dvou nebo vícečetné. Vnitřní, obvykle kulová nebo válcová nádoba (bod A) obsahuje kryogenní látku. Prostor mezi vnitřní chladnou stěnou a vnější stěnou (bod B) je vyčerpán přes ventil (bod E) na nízký tlak řádově 10<sup>-3</sup> Pa, aby se zabránilo přenosu tepla tepelnou vodivostí zbytkového plynu (Q<sub>p</sub>).

K udržování nízkého tlaku slouží absorbent (bod D). Vnitřní nádoba je vůči vnější nádobě připevněna materiálem, který má co nejmenší tepelnou vodivost ( $Q_k$ ). Vnitřní nádoba je zavěšena ve vnější nádobě na tenkostěnné trubici (bod C) z materiálu s nízkou tepelnou vodivostí (koroziivzdorná ocel nebo sklolaminát) a zároveň tvoří plnicí hrdlo. Díky dewarově nádobě dochází k potlačování tepelného toku konvekci, kondukcí, ale i radiací. [9]



Obr. 4.2: Dewarova nádoba

#### **4.4 Vlastnosti pevných látek za nízkých teplot**

Mezi základní vlastnosti pevných látek patří elektrická vodivost, dále tepelná vodivost, měrné teplo, tepelná roztažnost a mechanické vlastnosti.

##### **4.4.1 Elektrická vodivost**

U elektrické vodivosti mohou být látky rozděleny na izolanty, polovodiče, vodiče s vodivostí iontovou i kovovou. Supravodičem označujeme látky, jejichž elektrická vodivost klesne pod určitou kritickou teplotou k hodnotě nula. [9]

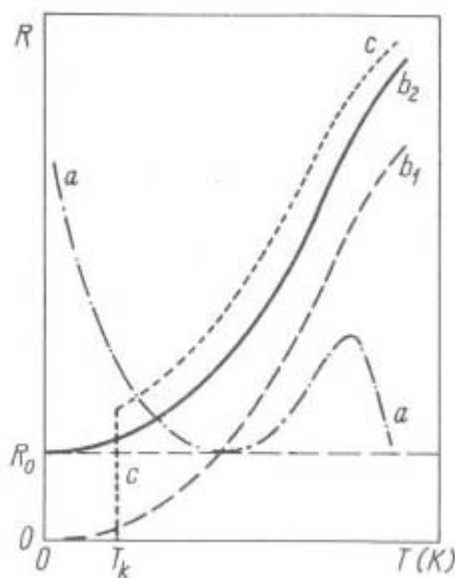
##### **4.4.1.1 Izolanty**

Izolační vlastnosti se u běžných izolantů s poklesem teploty zpravidla mírně zlepšují, protože vzroste odpor povrchové vrstvičky vlhkosti po jejím zmrznutí. Kryokapaliny jsou

obecně považovány za dobré izolanty. Měrný elektrický odpor kapalného dusíku LN<sub>2</sub> je 10<sup>15</sup> Ω.m. U kmitočtu 50 Hz je elektrická pevnost LN<sub>2</sub> 35 až 40 kV.mm<sup>-1</sup>. [9]

#### 4.4.1.2 Polovodiče

Počet nosičů náboje způsobujících elektrickou vodivost polovodičů s teplotou klesá, přičemž elektrický odpor roste. Při teplotě 0 K je vodivostní pás zcela prázdný a odpor stoupá k teoretickému nekonečnu viz obr. 4.3.



Obr. 4.3: Elektrická vodivost polovodičů při nízkých teplotách

U polovodiče typu N jsou při nízkých teplotách nejprve tepelně excitovány do vodivostního pásu nosiče náboje z úrovně příměsí ležící 10<sup>-2</sup> eV pod vodivostním pásem a teprve při vyšších teplotách nosiče z valenčního pásu. Energetická mezera mezi vodivostním a valenčním pásem je u křemíku řádu eV, proto existuje teplotní oblast, v níž jsou již vyčerpány všechny zdroje nosičů náboje z hladin příměsí, ale vlastní vodivost základního materiálu se ještě neuplatňuje. S ohledem na teplotní závislost pohyblivosti nosičů odpor s teplotou v této oblasti roste. Při ještě vyšších teplotách začíná v důsledku vlastní vodivosti vzrůstat počet vodivostních elektronů a závislost odporu na teplotě se změní na klesající (obr 4.3). [9]

### 4.4.1.3 Kovy

Elektrický odpor kovů je dán interakcemi elektronů s fotony nebo statickými defekty mřížky, což mohou být nečistoty, dislokace při tváření materiálu za studena, mechanické pnutí nebo hranice velikosti zrn. Tepelné kmity mřížky způsobují ideální elektrický odpor  $R_i$ , který je teplotně závislý podle Blochova-Grüneisenova vztahu (4.1).

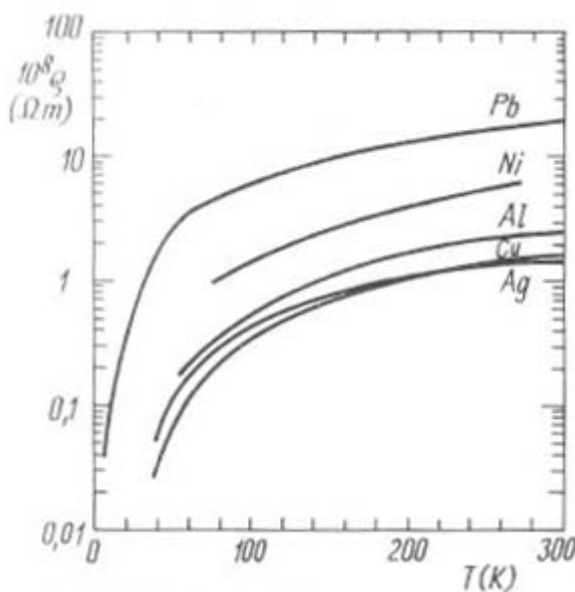
$$R_i = \frac{124,4AT^5}{M\Theta^6} \quad (\text{pro } T < 0,1 \Theta) \quad (4.1)$$

kde  $\Theta$  je charakteristická teplota,  $M$  atomová hmotnost a  $A$  charakteristická konstanta pro daný kov. Závislost  $R_i$  pro čistý kov je znázorněna křivkou  $b_1$  na obr. 4.3.

Druhá příčina elektrického odporu jsou interakce elektronů s nečistotami. Způsobuje to, že i pro  $T = 0 \text{ K}$  je zbytkový odpor  $R_0 \neq 0$ .

Podle Matthiessenova pravidla je dán výsledný odpor  $R$  součtem obou složek  $R = R_0 + R_i$ , viz křivka  $b_2$  na obr. 4.3.

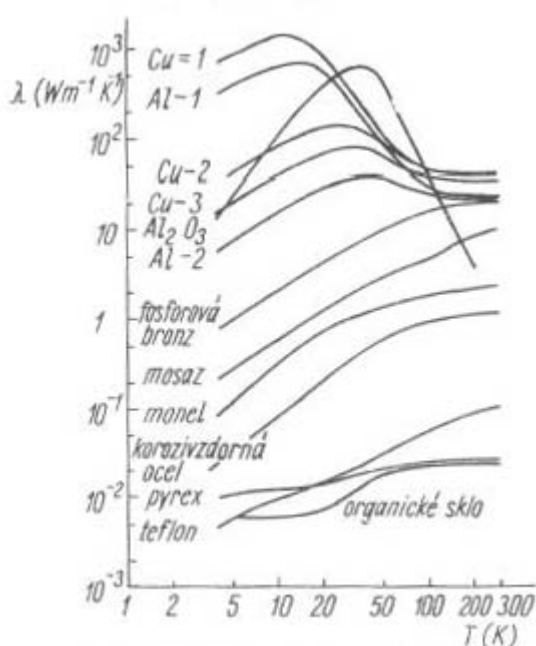
Na obr. 4.4 jsou uvedeny příklady teplotních závislostí měrného elektrického odporu pro některé čisté kovy. [9]



Obr. 4.4: Teplotní závislost měrného elektrického odporu u čistých kovů

#### 4.4.2 Tepelná vodivost

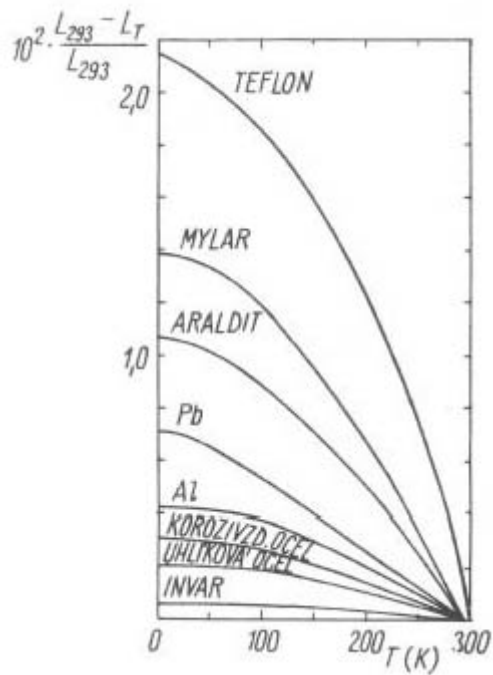
Tepelná vodivost je v pevných látkách určována dvěma hlavními přenosovými mechanismy. Jedná se o fononový mechanismus (vliv tepelných kmitů krystalové mřížky) a elektronový. Fononový se uplatňuje především v izolantech, zatímco v kovech se dominantně uplatňuje elektronový mechanismus. V oblasti nízkých teplot může nastat situace, kdy se poměr obou mechanismů významně změní. Přehled teplotní závislosti měrné tepelné vodivosti různých látek viz obr. 4.5. [9]



Obr. 4.5: Teplotní vodivost při nízkých teplotách

#### 4.4.3 Tepelná roztažnost

Lineární tepelná roztažnost (obr. 4.6) se začíná projevovat při nízkých teplotách, avšak s rostoucí teplotou se začne projevovat anharmonický člen, dále oscilace atomů kolem rovnovážných poloh, jež nejsou symetrické. Střední vzdálenost atomů roste a tím se projeví i tepelná roztažnost látky.



Obr. 4.6: Tepelná roztažnost při nízkých teplotách

Pro lineární roztažnost platí vztah (4.2):

$$^s\alpha = \frac{1}{3V} \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{{}^sG K c_v}{3V}, \quad K = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (4.2)$$

kde  $K$  je stlačitelnost a  ${}^sG$  je Grüneisenova konstanta, jež je mírou anharmonity kmitů atomů. Její hodnota se u běžných kovů pohybuje od 1 do 2,7. Protože  ${}^sG$  a  $K$  závisí na  $T$  jen velmi slabě, je  ${}^s\alpha(T)$  určena převážně závislostí  $c_v(T)$ , kde  $c_v$  je měrné teplo. [9]

## 5 CCD technologie

CCD (Charge Coupled Device) je elektronická součástka, která slouží pro záznam obrazové informace. Používá se například v digitálních fotoaparátech, videokamerách, scanerech, ale i v řadě vědeckých přístrojů, jakými jsou astronomické dalekohledy nebo průmyslové kamery.

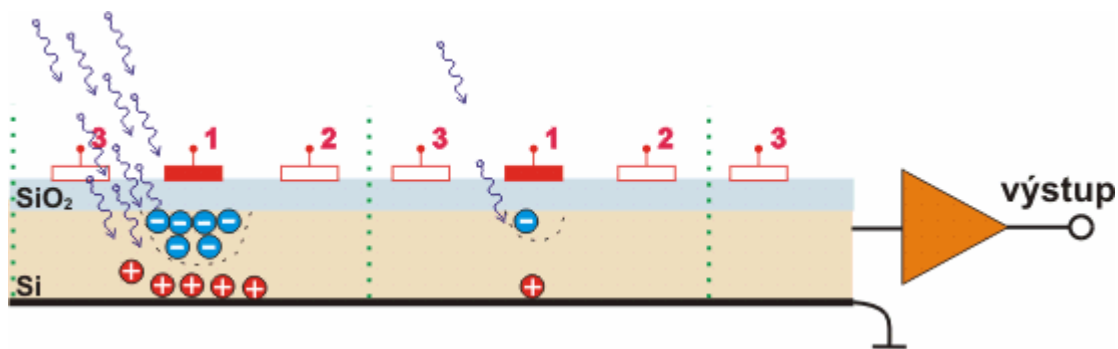
CCD senzor pracuje na principu fyzikálního jevu známého jako fotoefekt. Při tomto jevu dochází k nárazu částice fotonu do atomu, u kterého dojde k přemístění některého z jeho elektronů ze základního stavu do excitovaného.

### 5.1 Snímání obrazu

Oproti klasickým fotodiodám, kde elektrody odvádí volněný elektron v podobě generovaného proudu, tak u CCD senzorů je tato elektroda oddělena od polovodiče tenkou vrstvou oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2$ . Ten se chová jako dokonalý izolant a zachovává uvolněné elektrony v substrátu křemíku, který obsahuje dotované příměsi. Vznik obrazu se skládá ze tří částí.

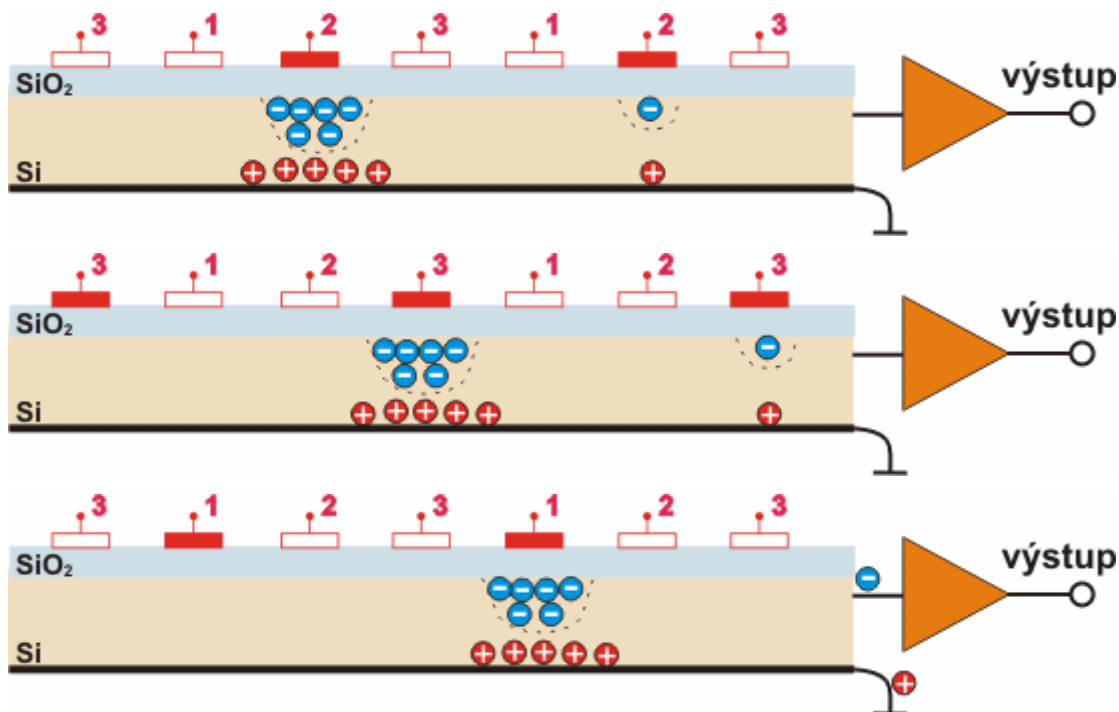
V první předpřípravné fázi je CCD senzor bez přístupu světla a všechny volné elektrony jsou odebrány, přičemž dojde k vymazání všech předchozích datových informací a senzor je připraven k expozici.

Při expozici (obr. 5.1) se přivede kladné napětí a na CCD senzor se nechá působit dopadající světlo. Fotony excitují v polovodiči elektrony, které jsou poté přitahovány ke kladně nabitým elektrodám. Dojde ke vzniku díry, která vykazuje kladný náboj a ten je přitahován na spodní elektrodu senzoru. Jednotlivé pixely jsou od sebe odděleny (na obr. 5.1 svislou tečkovanou čarou) a počet uvolněných elektronů udává intenzitu dopadu fotonů na danou buňku.



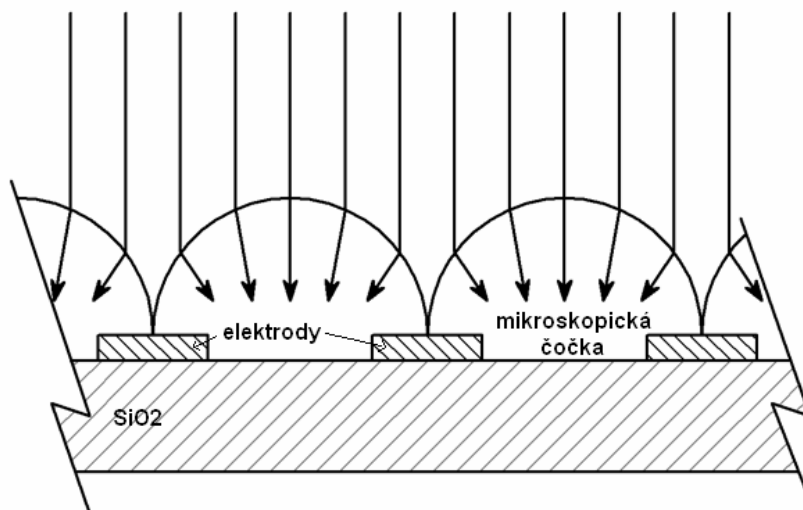
Obr. 5.1: Průběh expozice obrazu u CCD

Po dopadu fotonů se začne na jednotlivé pixely přivádět trojfázový hodinový signál (viz obr. 5.2), který začne pomalu zvyšovat napětí na druhé elektrodě, přičemž na první a třetí elektrodě se souběžně snižuje. Vytvoří se tak shluk elektronů pod druhou elektrodou a stejný děj se opakuje postupně pro všechny kombinace, kdy shluk elektronů je postupně posouván po elektrodě přes jednotlivé pixely až k výstupnímu zesilovači. Zesilovač jednotlivé výstupní proudy zesílí, podle odpovídajícího počtu dopadených elektronů a převede na napěťové úrovně, které již jsou zpracovávány digitální cestou přes A/D převodník.



Obr. 5.2: Průběh snímání obrazu u CCD

Elektrody na povrchu polovodiče jsou z napařeného hliníku, který tak působí jako zrcadlo a v těchto místech není senzor citlivý na dopadající světlo, čímž se zmenšuje efektivní plocha polovodiče. Pro tyto účely se ve finální fázi výroby vytváří na povrchu každého pixelu mikroskopické čočky (obr. 5.3), které částečně zlepšují efektivnost senzoru. [10]

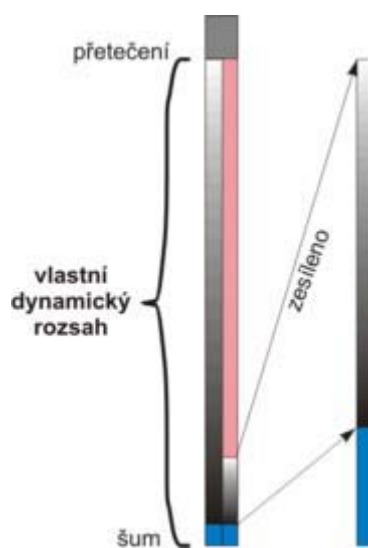


Obr. 5.3: Mikroskopické čočky u CCD senzorů

## 5.2 Chyby při snímání CCD

### 5.2.1 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah (obr. 5.4) udává rozsah odstínů od nejčernější černé  $[0, 0, 0]$  k nejbělejší bílé  $[255, 255, 255]$ , které dokáže CCD senzor rozlišit. Každá buňka je limitována vlastní kapacitou vzniklých elektronů, tedy počtem vniklých fotonů a dále hladinou vlastního šumu. [10]



Obr. 5.3: Dynamický rozsah CCD senzoru

### 5.2.2 Šum

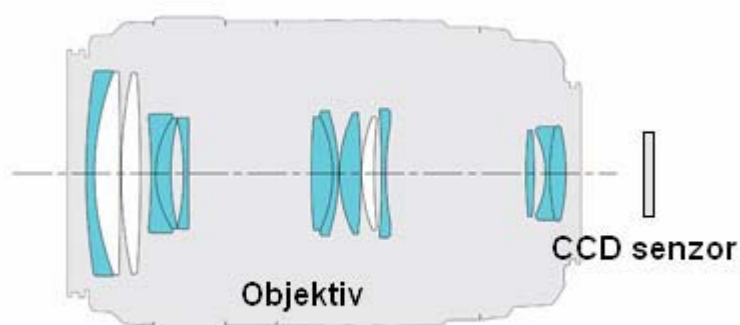
Vznik šumu v CCD senzoru je dán mnoha příčinami, mezi ty základní patří tepelný pohyb krystalové mřížky polovodiče. Při něm se občas uvolní elektron bez jakéhokoliv působení fotonu. Tento elektron je poté přitážen kladným napětím k elektrodě a přičítá se tak k výsledné expozici ve výstupním zesilovači.

Eliminace šumu není nikdy 100%-ní, proto je potřeba k dosažení vysokého dynamického rozsahu při přijatelné úrovni šumu, aby jednotlivé buňky byly co největší, tím se dosáhne zvětšení odstupe signálu od šumu. U vědeckých přístrojů se šum CCD snižuje chlazením samotného CCD senzoru např. kapalným dusíkem, suchým ledem (dry ice) nebo peltiérovým článkem.

Základní citlivost snímače se udává jako tzv. ISO citlivost, což je veličina používaná v klasické fotografii pro filmový materiál. Při zvyšování citlivosti snímače dochází k obrazovému zesílení obrazu, přičemž hodnota šumu je konstantní a dochází k nárůstu šumu spolu se signálem, viz obr. 5.3. [10]

### 5.2.3 Vinětace

Jak již bylo psáno v kapitole 5.1, každá buňka obsahuje vlastní mikroskopické čočky (obr. 5.3), na které dopadá maximum světla pouze ve směru kolmém k rovině senzoru. Při šikmém dopadu klesá účinnost buňky a tím pádem se snižuje kvalita výsledného obrazu, která vede k postupnému ztmavování směrem k okrajům. Proto jsou kladeny vysoké požadavky na výrobce objektivů, kteří tento problém řeší soustavou interních čoček (obr. 5.4), jenž mají za úkol šikmé paprsky dorovnat do kolmé roviny. [10]



Obr. 5.4: Řez vnitřní soustavou čoček u objektivu

### 5.2.4 Blooming

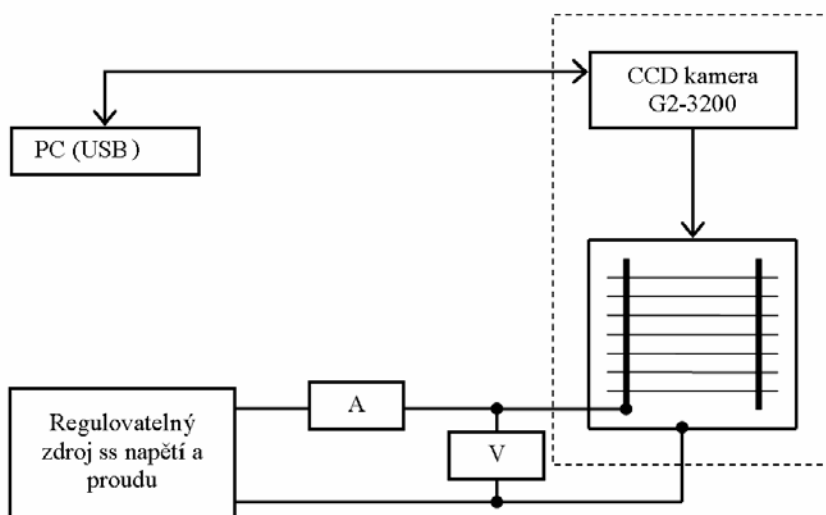
K tomuto jevu dochází při nadměrném dopadu světla na buňku, kdy přeteče jejich kapacita a přebytečné elektrony se roztečou do okolních pixelů, takže v okolí silného dopadu světla vzniknou na snímku rovnoběžné čárky o nepravidelných délkách.

## 6 Praktická část

Cílem práce bylo sestavit měřicí pracoviště, které bude obsahovat průmyslovou CCD kameru s objektivem, univerzální kontaktní pole, které dokáže pojmout 4“ až 6“ solární články a vše umístit do temné komory, která bude pracovat v rozsahu teplot  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výsledkem bude analýza měřících metod na principu elektroluminiscence a mikroplasmatu za použití kapalného dusíku a při standardní měřící teplotě  $25^{\circ}\text{C}$ . Jako porovnávací metoda je LBIC.

### 6.1 Návrh měřicího pracoviště

Prvním krokem bylo navržení a sestavení měřicího pracoviště, které je schématicky znázorněno na obr. 6.1. Základ tvoří průmyslová CCD kamera, která komunikuje s pracovní stanicí přes univerzální sériové rozhraní USB 1.1. Kostru pracoviště tvoří hliníková temná komora, kde v horní části nalezneme otvor pro CCD kameru s manuálním objektivem Canon. Základnu tvoří nerezová nádoba o průměru 300 mm, která je tepelně izolována polystyrénem od okolního prostředí.



Obr. 6.1: Měřicí pracoviště

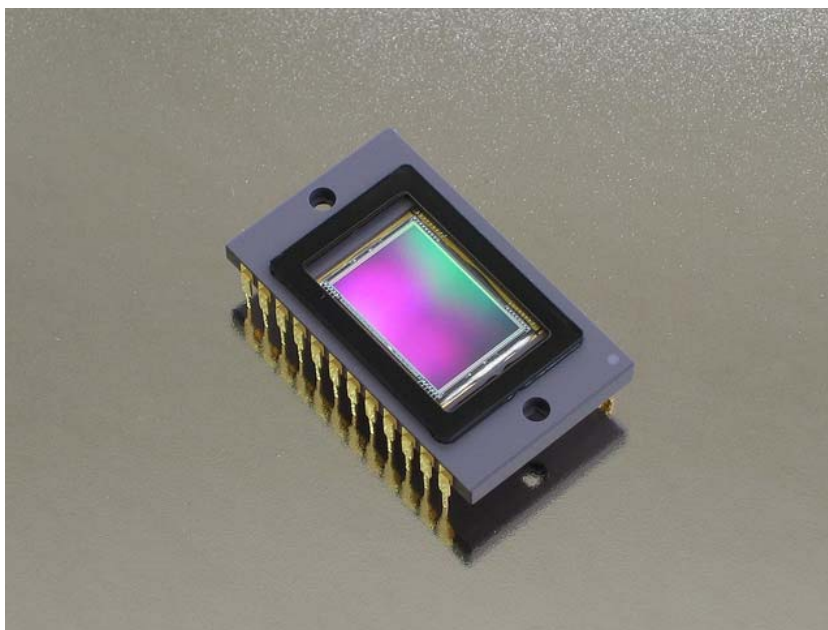
## 6.2 Průmyslová CCD kamera

CCD kamera firmy Moravské přístroje, a.s. (obr. 6.2), osazená nízkošumovým Full-Frame senzorem KAF-3200ME firmy Kodak (obr. 6.3) s fyzickým rozlišením 2184 x 1472 pixelů (3,2 miliónu obrazových bodů) a dvoustupňovým peltiérovým chlazením, které dosahuje teplotního gradientu 45°C pod okolní teplotu prostředí. Rozlišovací schopnost senzoru u klasického 4" solárního článku s rozměry 102,5 x 102,5 mm je přibližně 7  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ .



Obr. 6.2: CCD kamera G2-3200

16 bitový A/D převodník s korelovaným dvojítm vzorkováním bude zajišťovat vysoký dynamický rozsah a čtecí šum bude limitovaný pouze vlastním CCD čipem. Samotné články budou měřeny při stanovené okolní teplotě 25°C a při velmi nízkých teplotách za pomoci kapalného dusíku. [11]



Obr. 6.3: CCD senzor Kodak KAF-3200ME

CCD kamera disponuje moderním univerzálním sériovým rozhraním, známým pod označením USB s teoretickým maximálním datovým přenosem 12 Mbit/s, pomocí něhož komunikuje s pracovní stanicí, na které běží program SIMS v 1.01 firmy Moravské přístroje, a.s.

Dále tělo CCD kamery obsahuje automatický podavač filtrů s možností volby mezi čirým, infračerveným (IR) a RGB spektrem (červená, zelená a modrá) viz obr 6.4.



Obr 6.4: Vnitřní ústrojí CCD kamery G2-3200 spolu s podavačem filtrů

Pro měření jsme nejčastěji používali infračervený IR filtr, který filtruje sluneční spektrum o vlnové délce přes 700 nm, na které je solární článek nejvíce citlivý a pro lidské oko neviditelný. Jako další byl použit čirý filtr, který propouští celé sluneční spektrum od ultrafialového, přes viditelné až k infračervenému, přičemž celkový rozsah spektra, které dokáže solární článek efektivně převést je 300 – 1100 nm.

### **6.3 Temná komora**

Hlavní kostrou měřicího pracoviště je temná komora (obr. 6.5) z hliníkových plechů o tloušťce 2 mm. Skládá se ze tří oddělitelných částí, kdy každá část plní svou specifickou funkci.



Obr 6.5: Temná komora

Horní část plní stínící funkci tak, aby na CCD kameru nedopadalo nežádoucí okolní světlo, kdy vrchní část kamery obsahuje perforaci a dvojici otvorů pro aktivní chlazení dvoustupňového peltiérova článku a je zde riziko dopadu světla přímo na snímací CCD senzor.

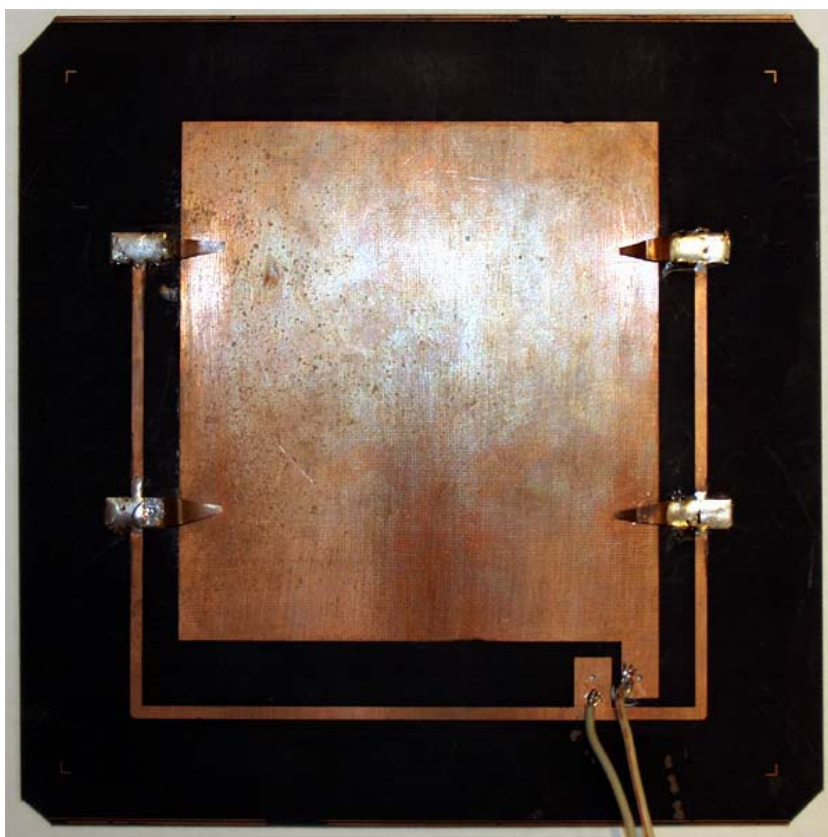
Prostřední část obsahuje na vrchní straně otvor pro CCD kameru spolu s manuálním objektivem Canon s ohniskovou vzdáleností 35 – 80 mm a s minimálním clonovým číslem F3,5 – F5,6, který kolmo dopadá na měřený solární článek. Dále dvířka pro manipulaci a výměnu měřeného vzorku solárního článku. Na boční straně je série průchodek pro měřící

vodiče k laboratorním přístrojům. Celá vnitřní část je nastříkána černým matným sprejem, aby byla maximálně eliminována možnost odrazu světla uvnitř temné komory.

Spodní část čtvercového půdorysu obsahuje nádobu z nerezové oceli o průměru 300 mm a zbytek prostoru obsahuje polystyrén, který slouží jako tepelná izolace kapalného dusíku vůči okolnímu prostředí. Vnitřní prostory nádoby obsahují druhou izolační vložku z polystyrénu, do které se nalévá již samotný kapalný dusík spolu s nakontaktovaným solárním článkem. Pro odvod odpařovaného dusíku jsou na stěnách umístěny dvojice přepadů.

#### **6.4 Kontaktní pole**

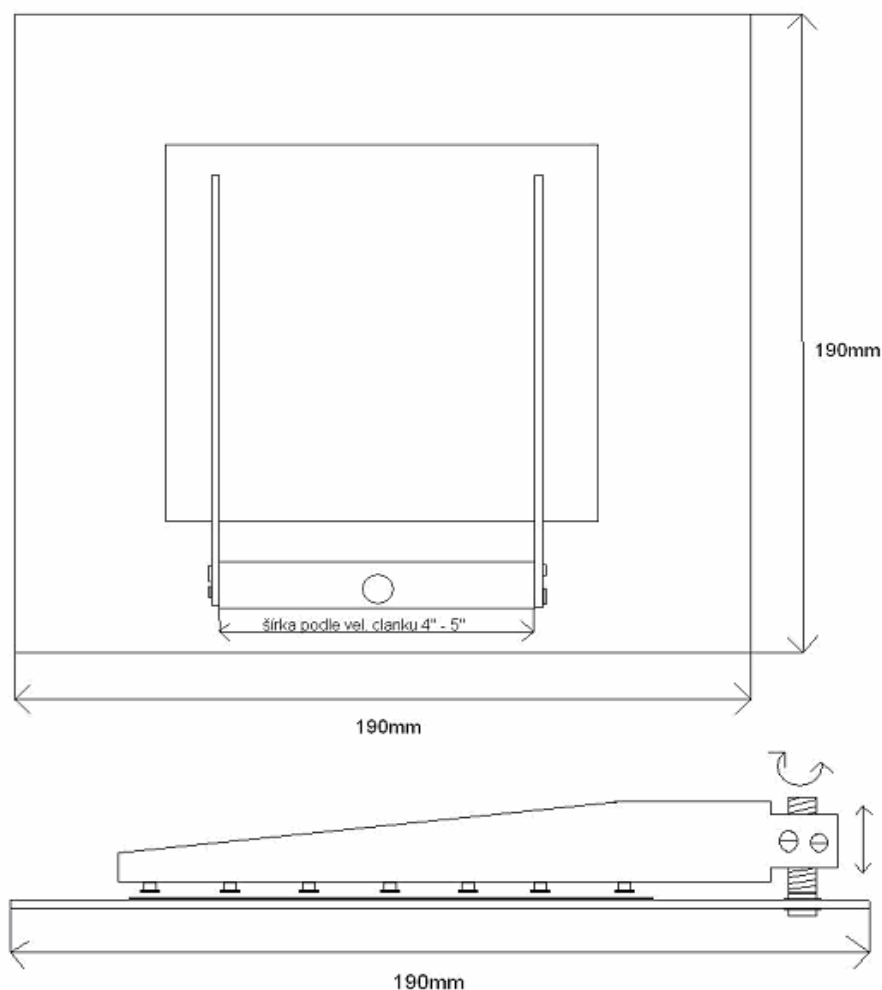
Dalším bodem návrhu a konstrukce je kontaktní pole (obr. 6.6), které slouží k upevnění a nakontaktování solárního článku. Je navrženo pro solární články o velikosti 4“ (102,5 x 102,5 mm) od firmy Solartec, s.r.o.



Obr 6.6: Kontaktní pole – horní pohled

Do stavu návrhu se dostalo i univerzální kontaktní pole pro 4“ (102,5 x 102,5 mm) až 6“ (156 x 156 mm) solární články, které má firma v budoucnosti sériově vyrábět.

V obou případech tvoří základ kuprexitová deska z materiálu FR-3, na které je vyleptána struktura pro solární články. U realizovaného návrhu tvoří horní kontakty čtveřice pinů, které se kontaktují na kraje sběrnice. Kontaktní pole je použitelné pro měření, ale dochází zde k nadměrné koncentraci proudové hustoty v místech doteku. U druhého návrhu (obr 6.7) by se měl problém odstranit rozložením kontaktovací části po celé délce sběrnice (bus baru) pomocí pozlacených pinů na pružinkách, které zajistí dostatečný přitlak, aniž by došlo k mechanickému poškození solárního článku.



Obr 6.7: Návrh univerzálního kontaktního pole – horní pohled, boční pohled

## **6.5 Vlastní měření**

Měření probíhalo na 4“ (102,5 x 102,5 mm) solárních článcích firmy Solartec, s.r.o., která je předem pomocí solárního simulátoru rozdělila do patřičných tříd podle účinnosti každého solárního článku. Byly vybrány články s velmi nízkou účinností (třída 12), až po kvalitní články přesahující třídu 30, tedy s účinností kolem 17%, které se používají do velkých solárních panelů.

U každého z vybraných článků byla provedena dvojice měření, jak pro jev elektroluminiscence v propustném stavu, tak mikroplazmy ve směru závěrném.

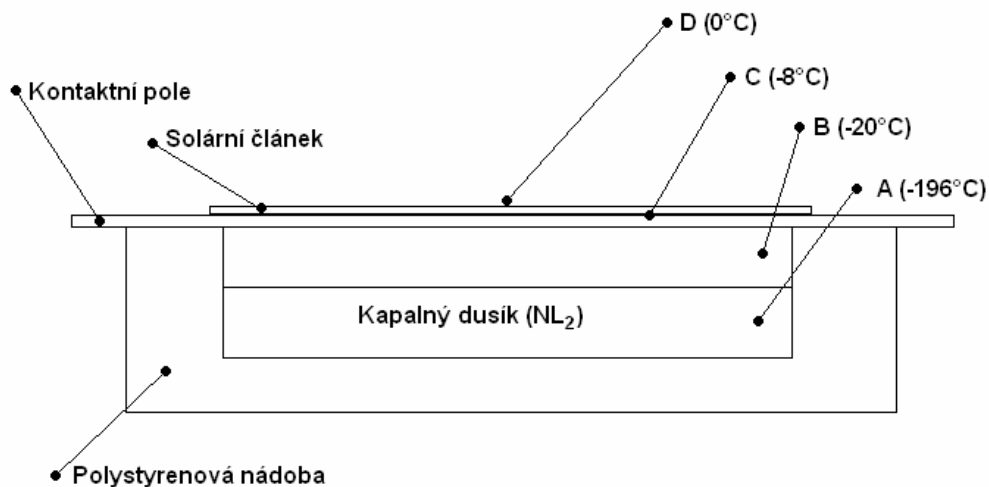
Pro maximální potlačení teplotního šumu byla provedena měření za pokojové teploty 25°C a za snížené teploty pomocí kapalného dusíku. Díky fyzikálním vlastnostem popsaných v kapitole 4.4.1.2 nemohl kapalný dusík sloužit jako aktivní chladicí médium, tedy přímé ponoření solárního článku do kapaliny. Při experimentálním měření na testovacím vzorku docházelo během krátké doby k přerušení generování párů elektron-díra, kdy vlivem velmi nízké teploty docházelo ke stavu, že vodivostní pás solárního článku byl zcela prázdný a nežádoucí odpor stoupal k teoretickému nekonečnu.

Dalším experimentálním pokusem bylo vytvoření souvislé hladiny tekutého dusíku s rovinou kontaktního pole, tedy dusík zde sloužil již jako pasivní chladicí médium. Problém s měřením se opakoval jako v prvotním pokusu, přičemž časový interval byl delší. U tohoto typu měření způsoboval odpařovaný dusík kondenzaci vlhkosti vzduchu na povrchu solárního článku vytvořením tenké vrstvy námrazy (obr. 6.8) a proto ani nebylo možné zachytit elektroluminiscenci a mikroplazmu pomocí CCD kamery. Další problém nastal při udržování konstantní hladiny, kdy dusík se odpařoval vlivem ochlazování materiálu kontaktního pole.



Obr 6.8: Solární článek – tenká vrstva námrazy

Nakonec byla zvolena metoda pasivního chlazení (obr. 6.9), kdy kapalný dusík byl nalit do polystyrénové nádoby a následně zakryt kontaktním polem. Díky tomuto řešení nedocházelo k námraze solárního článku, protože odpařovaný dusík má větší hustotu a byl odváděn pomocí přepadů v temné komoře. Pomocí teplotních čidel byla změřena teplota v jednotlivých částech měřicího pracoviště, kdy kontaktní pole bylo ochlazováno na spodní straně odpařovaným dusíkem na teplotu  $-20^{\circ}\text{C}$ . Díky tepelné vodivosti kuprexitu typu FR-3, byla teplota mezi polem a zadním kontaktem solárního článku na hodnotě  $-8^{\circ}\text{C}$  a samotný článek měl na snímaném povrchu teplotu  $0^{\circ}\text{C}$ , tedy teplotu, která je běžná za zimního období.



Obr. 6.9: Polystyrenová nádoba, teplotní rozdělení

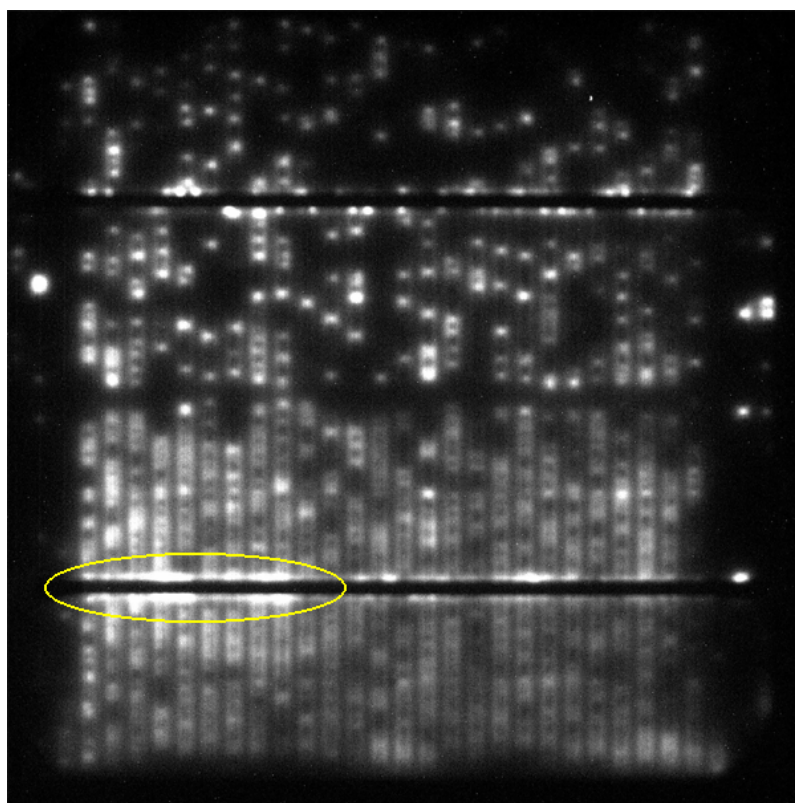
Pro každou metodu byl zvolen pracovní postup měření, aby výsledky byly do budoucna porovnatelné s jinými články. U elektroluminiscence se provádělo měření pomocí regulovatelného stejnosměrného zdroje, kdy se postupovalo v krocích 1 A, 2 A, 3 A a 3.5 A, naopak u mikroplazmy se nastavovalo napětí v rozmezí 4 V – 10 V po 1 V kroku. Doba expozice byla 20 sekund a byl použit čirý i IR filtr na CCD kameře.

## 6.6 Naměřené defekty solárních článků

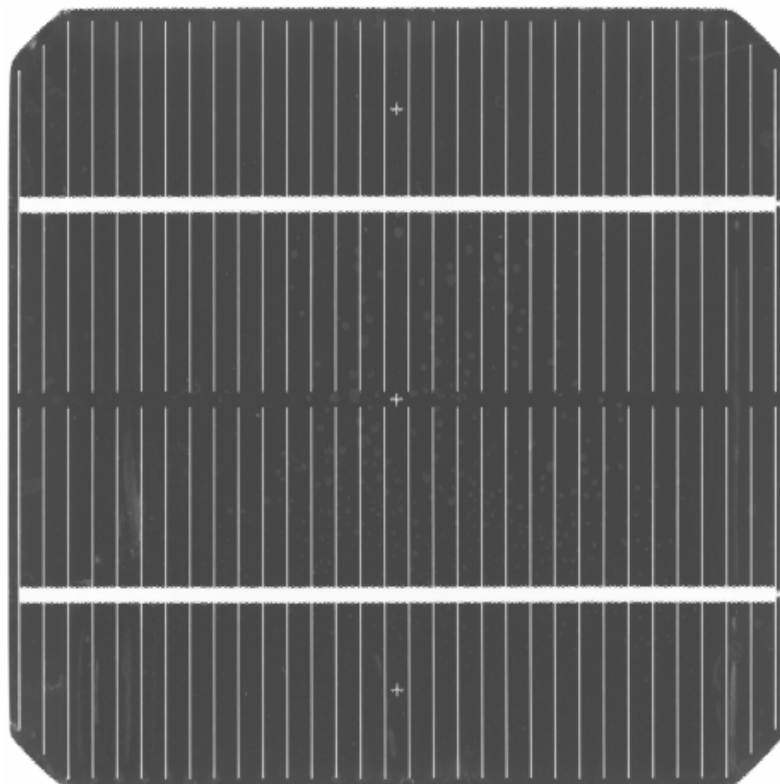
Mezi nejčastější procesní defekty u solárních článků patří nehomogenita difúzní vrstvy, která vzniká vniknutím nečistot do plynného fosforu při vytváření vrstvy typu N. Tato nehomogenita se u elektroluminiscence vyznačuje tmavou oblastí, která je dostatečně patrná u měřeného článku třídy 12 (obr. 6.10) při stejnosměrném napětí 1,3 V a proudu 3,5 A.

U článku je patrné i nerovnoměrné rozložení proudové hustoty v oblasti označené žlutou barvou. Dochází zde k nadměrnému kumulování proudu, který je způsoben velkým kontaktním přechodovým odporem  $R_S$  mezi vrstvou polovodič-kov na sběrnici.

Pro porovnání výsledků měření je použita metoda LBIC (obr. 6.11), u které není patrné nerovnoměrné rozložení proudu díky odlišnému druhu kontaktování k měřicímu pracovišti.

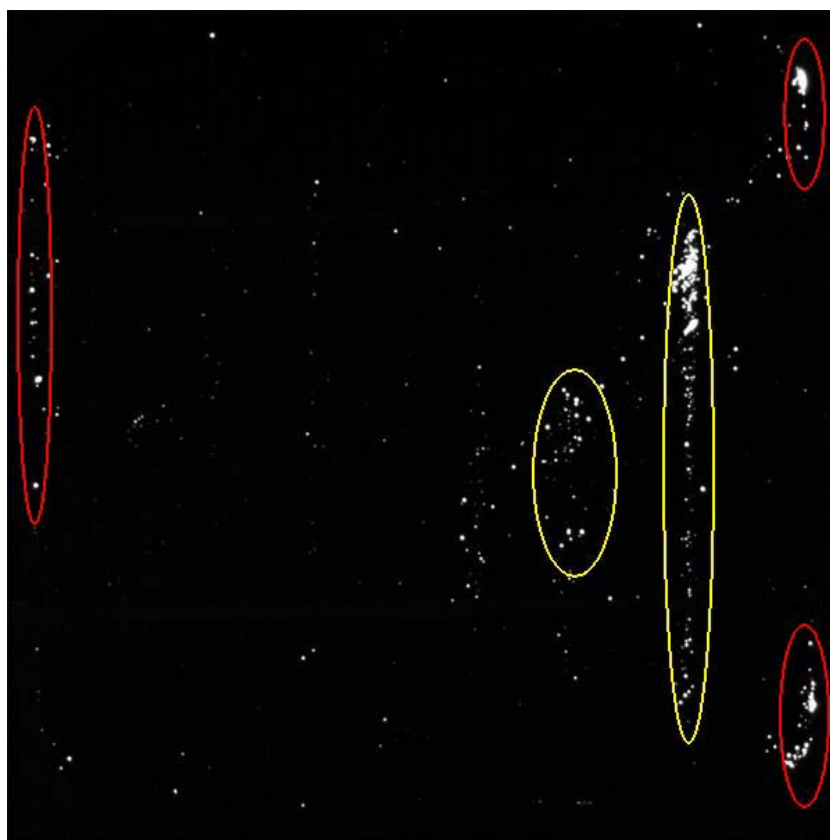


Obr. 6.10: Solární článek třídy 12, metoda elektroluminiscence,  $t = 20$  s,  $I = 3,5$  A, IR filtr



Obr. 6.11: Solární článek třídy 12, metoda LBIC,  $t = 150$  min, zelená LED dioda

U stejného článku byla provedena i metoda mikroplasmy, kdy solárnímu článku je dodáváno závěrné napětí 10 V a proud 0,26 A. Světlá místa na obr. 6.12 jsou způsobena poruchami v PN přechodu, kde dochází vlivem poškození krystalické mřížky k lokálnímu lavinovému výboji, který vyvolává emisi světla. Mezi nejčastější příčiny vzniku těchto defektů patří špatné zabroušení, případně porušení hran při výrobě (červená barva) nebo materiálové trhliny a mikroškrábance na povrchu solárního článku (žlutá barva).

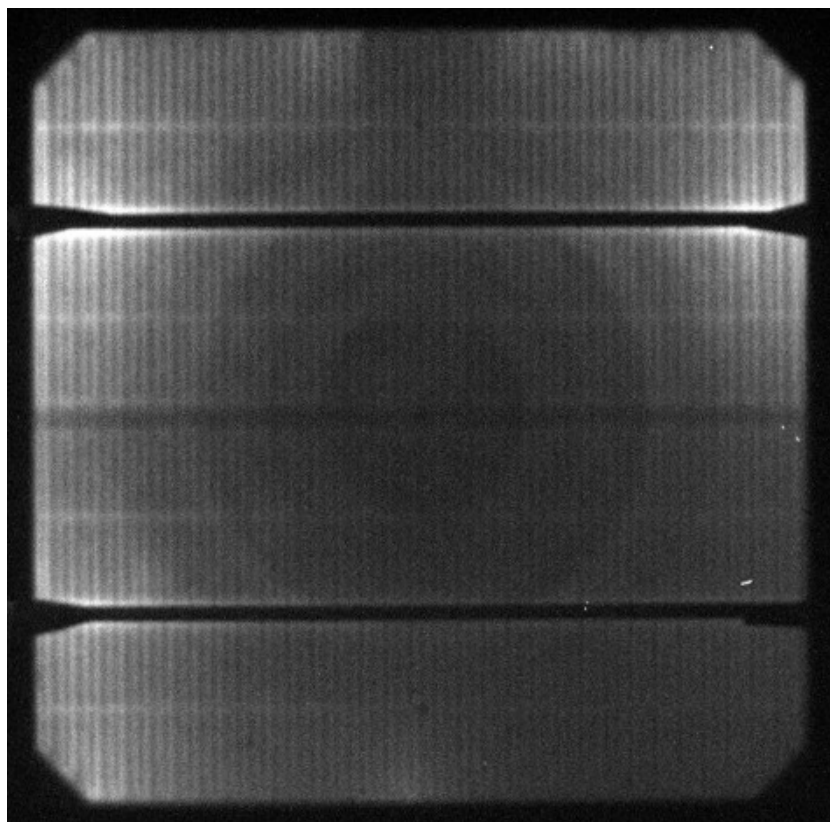


Obr. 6.12: Solární článek třídy 12, metoda mikroplasmy,  $t = 20$  s,  $U = 10$  V, IR filtr

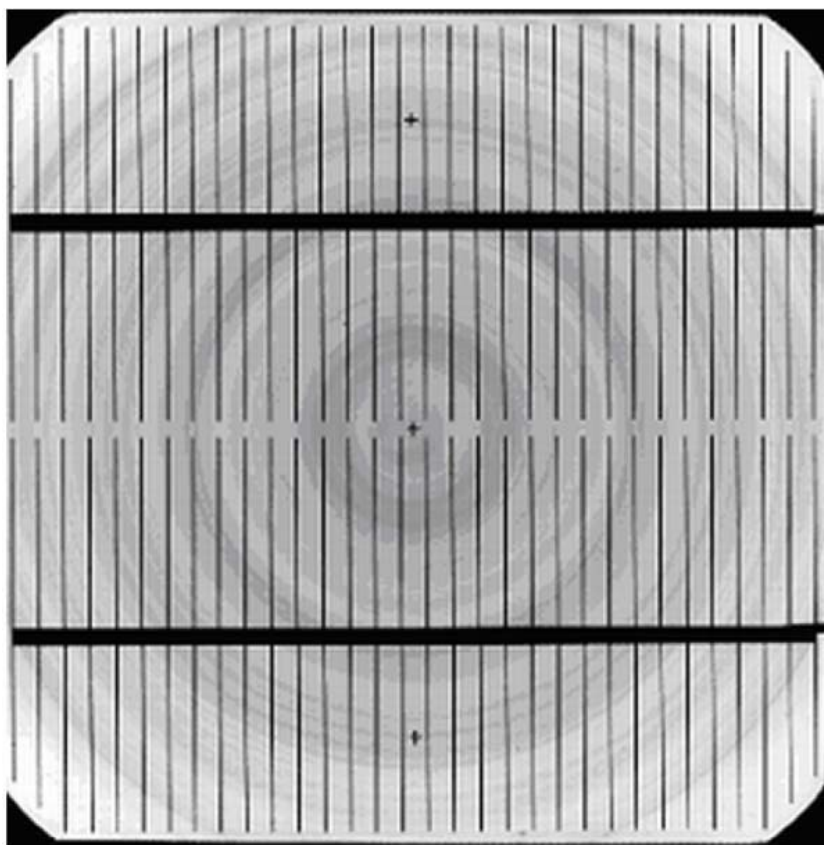
Mezi další materiálové defekty patří vírové defekty (Swirl Defects), které se projevily u článku třídy 28, (elektroluminiscence obr. 6.13, LBIC obr. 6.14). Jedná se o soustředné kružnice, které jsou způsobeny již při samotné výrobě surového ingotu tažením očkovacího křemíkového krystalu pomocí Czochralského metody, kdy se do ochranné atmosféry dostávají příměsi nečistot, nejčastěji kyslík, který se v tavenině váže reakcí:



Jako druhotný problém je nevyhnutelná reakce vysoce čisté křemíkové taveniny s křemenným sklem kelímku., které je zahříváno na vysoké teploty topným vinutím. [3]



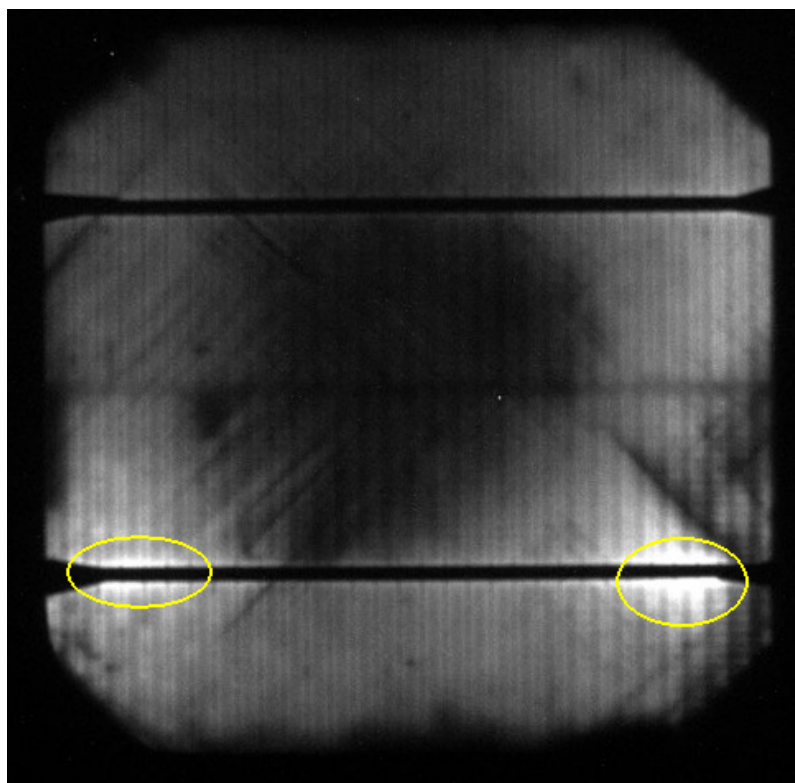
Obr. 6.13: Solární článek třídy 28, metoda elektroluminiscence,  $t = 20$  s,  $I = 3.5$  A, IR filtr



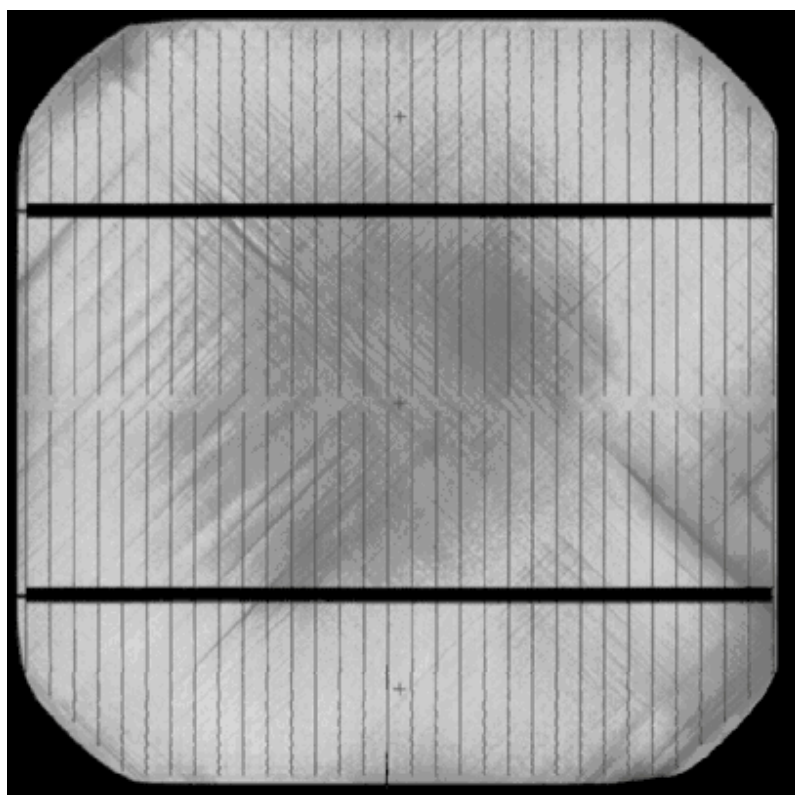
Obr. 6.14: Solární článek třídy 12, metoda LBIC,  $t = 150$  min, IR LED dioda [7]

Dalším materiálovým defektem je tzv. pnutí v křemíku (obr. 6.15), které opět vzniká při samotném průběhu výroby ingotu křemíku pomocí Czochralského metody. Vzniká při nedokonalém výrobním procesu, kdy z taveniny není dostatečně odváděno teplo přes očkovací krystal a dochází k nedokonalému tuhnutí a případné poruše krystalografické orientace podélné osy krystalu. Na obr. 6.16 porovnání s metodou LBIC.

U článku byla opět při napětí 1,2 V a proudu 3,5 A zaznamenána vysoká proudová hustota u místa kontaktování (žlutá barva), kde vznikl přechodový odpor kov-kov, který je dán nežádoucím sériovým odporem  $R_S$ .



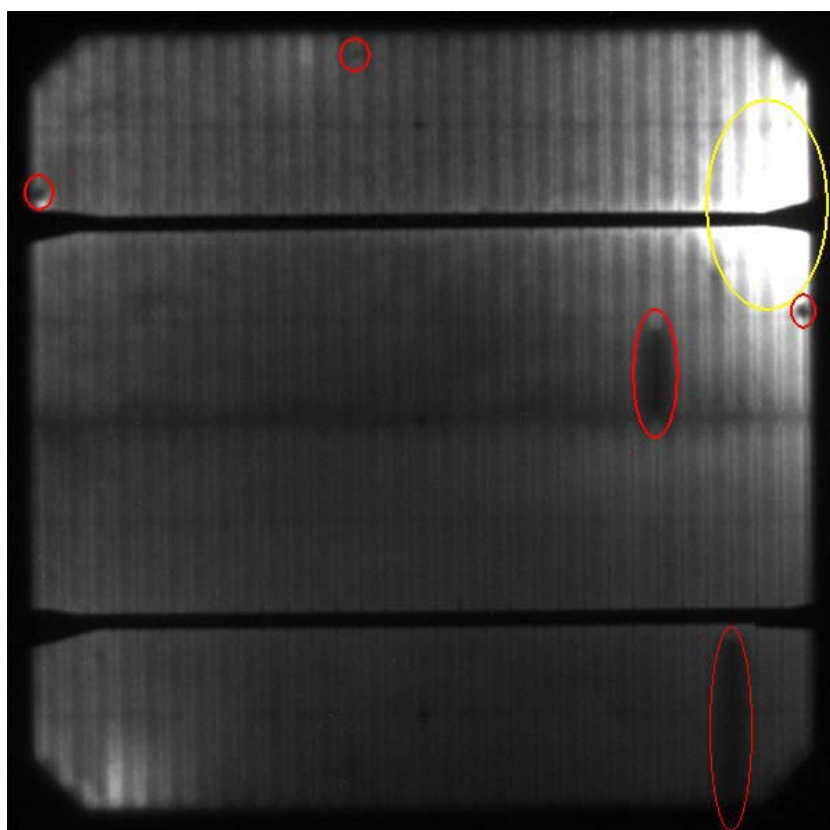
Obr. 6.15: Solární článek, metoda elektroluminiscence,  $t = 20$  s,  $I = 3.5$  A, IR filtr



Obr. 6.16: - Solární článek, metoda LBIC,  $t = 150$  min, IR LED dioda [7]

Pro měření byl použit i solární článek vyšší třídy, konkrétně 33, který by měl obsahovat nejmenší počet procesních i materiálových defektů, které snižují jeho výslednou účinnost.

Na obr. 6.17 je však patrná nehomogenita difúzní vrstvy (červená barva) při napětí 1,2V a proudu 3,5 A a dále zvýšená proudová hustota v místě přechodového kontaktu kov-kov (žlutá barva).



Obr. 6.17 - Solární článek třídy 33, metoda elektroluminiscence,  $t = 20$  s,  $I = 3.5$  A, IR filtr

## 7 Závěr

Cílem práce a měřením bylo prokázáno, že pomocí metody elektroluminiscence dokážeme měřit jak materiálové defekty, mezi něž patří vírový „Swirl“ defekt a pnutí materiálu křemíku, tak i defekty procesní.

Procesní defekty vznikají především při samotné výrobě solárního článku z nařezaného plátku křemíku, který postupně prochází výrobní fází. Mezi základní defekty patří nehomogenní difúzní vrstva vlivem nežádoucích příměsí v plynném fosforu, kterým se vytváří PN přechod.

Další z defektů je kumulování proudu na přechodu polovodič-kov, kov-kov při výpalu předního a zadního kontaktu, který je nanášen metodou sítotisku. Dalším procesním defektem je poškození povrchu solárního článku vlivem neopatrné manipulace při výrobě, špatným zabroušením hran nebo mikroškrábance.

Naopak metodou mikroplazmy, která probíhá v závěrném směru, se dají měřit pouze procesní defekty na povrchu a hranách solárního článku. Tyto defekty vytváří v místě poškození krystalické mřížky emisi světla, která se uvolňuje díky lavinovému výboji v PN přechodu.

Metoda LBIC (Light Beam Induced Current), kterou jsme porovnávali výsledky měření dokáže stejně jako metoda elektroluminiscence detekovat materiálové i procesní defekty. Nevýhodou LBIC je její časová náročnost, která se pohybuje v řádu několika hodin narozdíl od 20 sekundové expozice u CCD kamery použité při tomto měření.

Pro všechny diagnostické metody je zapotřebí dokonale temného prostředí při měření. U metod elektroluminiscence a mikroplazmy se projevoval teplotní šum, který byl experimentálně potlačen ochlazením solárního článku tekutým dusíkem. Při přímém ponoření článku do kapalného dusíku došlo po krátké chvíli k dramatickému nárůstu parazitního sériového odporu  $R_S$  vlivem velmi nízké teploty a vodivostní pás polovodiče byl téměř prázdný. Při pasivním ochlazování se nám podařilo udržovat teplotu článku na konstantní hodnotě 0°C, přičemž výsledné snímky se neliší od snímků za pokojové teploty 25°C. Jediný rozdíl je při nízkém napětí u mikroplazmy, kdy byl odebíraný proud vyšší.

Jako referenční hodnoty pro měření solárních článků při sériové výrobě by se dal považovat stejnosměrný proud 3 A pro metodu elektroluminiscence a napětí 6 V u

mikroplasmy. V obou případech jsou již na výsledných snímcích patrné defekty. Výsledky všech měření pro jednotlivé články jsou přiloženy v příloze.

Pro průmyslovou výrobu je tedy nejvhodnější metoda elektroluminiscence, která ve spojení se slunečním simulátorem dokáže odhalit jak materiálové a procesní defekty, tak proměřit i elektrické parametry solárního článku. Tento proces by se dal aplikovat i na plně automatizovanou výrobu solárních článků.

Díky správné detekci vzniku defektů může dojít k zvýšení kvality produkce solárních článků a tím i ke zvýšení výstupního výkonu, což má za následek širší rozvoj solární energie v praxi při současném snižování výrobních nákladů.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] Internetové stránky Fyzikální ústav AV ČR, Dostupné z WWW:  
[http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni\\_energie.php](http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni_energie.php)
- [2] A. Jäger-Waldau: PV Status Report 2007, European Commision, DG JRC, September 2007
- [3] VANĚK, J., KŘIVÍK, P., NOVÁK, V.,: Alternativní zdroje energie – elektronický text, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006
- [4] Internetové stránky společnosti Odborné časopisy, Dostupné z WWW:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/download/svetlo/2007/sv040736.pdf>
- [5] Internetové stránky společnosti Solartec s.r.o., Dostupné z WWW:  
<http://www.solartec.cz/cs.html>
- [6] BOTHE, K., POHL, P., SCHMIDT, J., WEBER, T., ALTERMATT, P., FISHER, B., BRENDDEL, R., Electroluminescence imaging as an in-line characterisation tool for solar cell production, Germany 2005
- [7] VAŠÍČEK, T.,: Charakterizace vlastností křemíkových krystalických solárních článků, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004
- [8] Internetové stránky ČVUT – Fakulta elektrotechnická, Dostupné z WWW:  
[http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni\\_energie.php](http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni_energie.php)
- [9] JELÍNEK, J., MÁLEK, Z., Kryogenní technika, Nakladatelství technické literatury, Praha
- [10] Internetové stránky Wikipedia CS, Dostupné z WWW:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>
- [11] Internetové stránky společnosti Moravské přístroje a.s., Dostupné z WWW:  
<http://www.mii.cz/>

## 9 Seznam použitých symbolů

|          |                                                     |
|----------|-----------------------------------------------------|
| $A$      | - charakteristická konstanta pro kov                |
| AM-1.5   | - sluneční spektrum                                 |
| $c_v$    | - měrné teplo                                       |
| $E$      | - energie fotonu                                    |
| $E_g$    | - šířka zakázaného pásu                             |
| $f$      | - frekvence                                         |
| FF       | - činitel plnění (Fill Factor)                      |
| $^gG$    | - Grüneisenova konstanta                            |
| $h$      | - Planckova konstanta                               |
| $I$      | - elektrický proud                                  |
| $I_{PM}$ | - maximální proud                                   |
| $I_{SC}$ | - zkratový proud, neboli proud nakrátko             |
| $M$      | - atomová hmotnost                                  |
| MPP      | - maximální výkon (Maximum Power Point)             |
| $P_M$    | - maximální výkon                                   |
| $P_O$    | - ideální sluneční výkon                            |
| $\Theta$ | - charakteristická teplota                          |
| $R_D$    | - dynamický odpor                                   |
| $R_{CH}$ | - charakteristický odpor                            |
| $R_i$    | - ideální elektrický odpor                          |
| $R_S$    | - sériový odpor                                     |
| $R_{SH}$ | - paralelní odpor                                   |
| $R_T$    | - odporový bočník                                   |
| $U$      | - elektrické napětí                                 |
| $U_{OC}$ | - napětí otevřeného obvodu, neboli napětí naprázdno |
| $U_{PM}$ | - maximální napětí                                  |