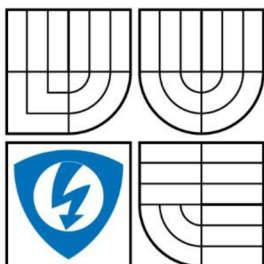


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

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

# CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI LUMINISCENČNÍHO ZÁŘENÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

CHARACTERISTICS FEATURES OF LUMINESCENCE RADIATION SOLAR CELLS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MARTIN MALÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. RADEK STOJAN**

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Martin Malý

**ID:** 134550

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2012/2013

## NÁZEV TÉMATU:

**Charakteristické vlastnosti luminiscenčního záření solárních článků**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku vzniku luminiscenčního záření a jeho charakteristických vlastností. V rámci práce se seznámte s různými měřicími metodami pro detekci defektů funkční struktury solárních křemíkových článků. V laboratoři diagnostických metod solárních článků Ústavu elektrotechnologie v Brně proměřte metodou elektroluminiscence (s polarizačním analyzátozem) vybrané solární články. Proveďte 3D analýzu výsledků elektroluminiscence.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 6.6.2013

**Vedoucí práce:** Ing. Radek Stojan

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi luminiscenčního záření fotovoltaických článků při elektroluminiscenci. Elektroluminiscence je děj, kdy látka začne vyzařovat elektromagnetické záření (tedy luminiscenci) vlivem procházejícího elektrického proudu.

Různé defekty ve struktuře fotovoltaického článku mohou mít různý dopad na vlastnosti tohoto záření, jako např. způsobit polarizaci onoho záření.

Cílem této bakalářské práce je proměření několika vzorků polykrystalických fotovoltaických článků metodou elektroluminiscence. U vybraného článku rozšířit měřicí aparaturu o polarizační detektor a naměřená data zpracovat v programu MATLAB.

## Abstract:

This thesis deals with characteristic features of luminiscence radiation solar cells during electroluminiscence. Electroluminiscence is the process in which a substance begins to radiate electromagnetic radiation (luminiscence radiation) due to passing electrical current.

Various defects in the structure of the photovoltaic cell can cause polarization of that radiation.

The aim of this thesis is to measure some polycrystalline solar cells by electroluminiscence. Selected solar cell is measured by electroluminiscence extended by polarizing filter and afterward collected data are processed in MATLAB.

## Klíčová slova:

Fotovoltaický článek, polarizace, mikroprasklina, elektroluminiscence, polarizační filtr, defekt, křemík, polovodič, CCD kamera, diagnostika.

## Keywords:

Photovoltaic cell, polarization, microcrack, electroluminiscence, polarizing filter, defect, silicon, semiconductor, CCD camera, diagnostic.

## Bibliografická citace díla:

MALÝ, M. *Charakteristické vlastnosti luminiscenčního záření solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 37s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Stojan.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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: .....

.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Radku Stojanovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.



# Obsah

ÚVOD .....	7
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>8</b>
1.1. Slunce, zdroj energie .....	8
1.2. Fotoelektrický jev.....	9
1.3. Fotovoltaický článek .....	10
1.3.1. Přechod P-N.....	10
1.3.2. Struktura FV.....	10
1.4. Typy fotovoltaických článků.....	11
1.4.1. Monokrystalické .....	11
1.4.2. Polykrystalické .....	11
1.4.3. Amorfni.....	12
1.5. Defekty fotovoltaických článků .....	12
1.5.1. Nehomogenní difúzní vrstva.....	12
1.5.2. Vnitřní pnutí .....	13
1.5.3. Virový defekt .....	13
1.5.4. Mechanické poškrábání .....	14
1.5.5. Nedokonalé kontaktování .....	14
1.5.6. Mikroprasklina.....	14
1.5.7. Dislokace v polykrystalickém křemiku .....	15
1.5.8. Kyslíkové precipitáty.....	15
1.6. Luminiscence .....	16
1.6.1. Mechanizmy luminiscence.....	16
1.6.2. Rozdělení luminiscence podle způsobu buzení a trvání .....	17
1.6.3. Elektroluminiscence křemiku .....	17
1.6.4. Vlastnosti luminiscenčního záření .....	18
1.7. Polarizace .....	18
1.7.1. Lineární polarizace .....	19
1.7.1. Eliptická polarizace .....	19
1.7.2. Kruhová polarizace.....	19
1.7.3. Způsoby polarizace .....	19
1.7.4. Polarizace luminiscenčního záření defektu dislokace .....	20
1.8. Vybrané diagnostické metody.....	21
1.8.1. Elektroluminiscence .....	21
1.8.2. Fotoluminiscence .....	21

1.8.3. Záření mikroplazmy .....	21
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>22</b>
2.1. Měřicí pracoviště.....	22
2.2. CCD kamera.....	23
2.3. Program SIMS.....	24
2.4. Měření polarizace luminiscenčního záření.....	25
2.4.1. Měření klasickou metodou elektroluminiscence .....	25
2.4.2. Měření s polarizačním detektorem.....	25
2.4.3. Měření pomocí lineárního a cirkulárního polarizačního filtru .....	26
2.5. Analýza v MATLAB.....	27
2.5.1. IR_view.....	27
2.5.2. Měření v bodech.....	28
2.5.3. Odčítací metoda .....	30
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>32</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>33</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>36</b>

# Úvod

Fotovoltaika je vědní obor, který se zabývá přeměnou dopadajícího elektromagnetického záření na elektrickou energii. Fotovoltaický článek je v povědomí lidstva již od roku 1839, ale až do poloviny 20. století byl pouze zájmem fyzikálního bádání. Teprve po zvládnutí výroby monokrystalického křemíku se začalo zvažovat využití fotovoltaických článků v praxi. Jako jedno z prvních, našly fotovoltaické články uplatnění v kosmonautice. Kosmické družice a satelity potřebují pro svou činnost elektřinu a tu mohou čerpat pouze ze slunečního záření. Dnes mají články široké využití. Experimentální automobily na solární pohon, kalkulačky, energetika, aplikace v domácnostech pro vytápění nebo chystaná integrace fotovoltaických článků do displejů moderních „chytrých telefonů“ [5].

V dnešní době je fotovoltaika jedno z nejrychleji se rozvíjejících odvětví, které má nezastupitelné místo ve svém oboru. S největší pravděpodobností ještě značně vzroste její důležitost, neboť se jedná o nevyčerpatelný zdroj čisté elektrické energie. Navíc otázky týkající se neobnovitelných zdrojů se objevují čím dál častěji.

Účinnost komerčně prodávaných fotovoltaických článků je ale bohužel stále na hranici 20%. Proto se spousta vědců z celého světa snaží řešit problémy spojené s technologií výroby a redukce výskytu defektů, které ve velké míře fotovoltaické články znehodnocují. V laboratorních podmínkách již bylo dosaženo podstatně lepších výsledků. Výroba takových článků je ale složitá a finančně náročná.

V následujících kapitolách této práce bude objasněno, co to je fotoelektrický jev a solární článek, jeho struktura a princip výroby. Jelikož tématem této práce je luminiscenční záření článků, bude zde probráno, co to je luminiscenční záření, polarizace záření obecně a také jak se dá luminiscenční záření polarizovat.

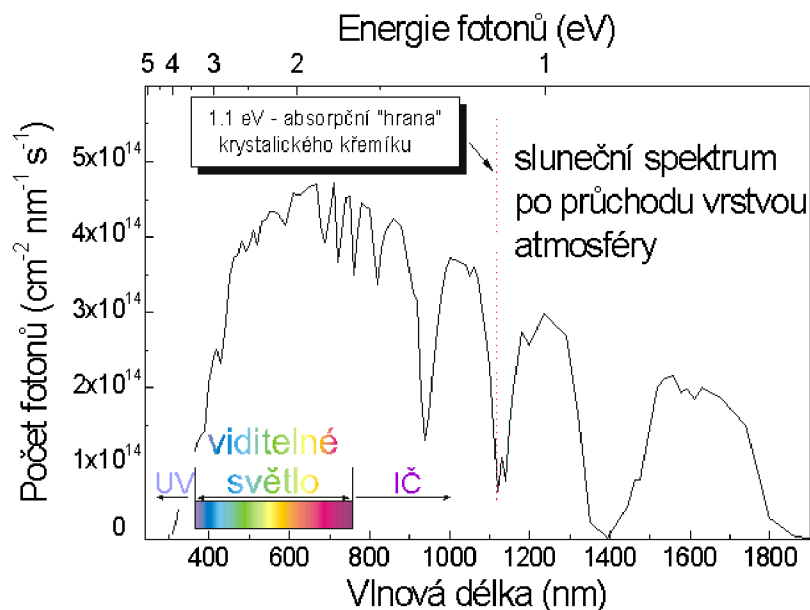
Praktická část se zabývá aplikací diagnostické metody fotovoltaických článků elektroluminiscence. Měřicí aparatura této metody je následně rozšířena o nosnou konstrukci a polarizační filtr, díky němuž je možné zaznamenat polarizační závislosti. Naměřená data jsou poté zpracována v programu MATLAB.

# 1 Teoretická část

## 1.1. Slunce, zdroj energie

Slunce je jediná hvězda, která bezprostředně ovlivňuje život na naší planetě - Zemi. S průměrem 1 392 000 km a s průměrnou hustotou  $1408 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  tvoří až 99,86 % hmotnosti celé sluneční soustavy. Je to obrovský zdroj energie, bez které by život na Zemi nebyl vůbec možný. V jádře slunce probíhají termonukleární reakce, kdy se slučují jádra vodíku za vzniku jader hélia. Tyto reakce spojené s obrovskými tlaky uvnitř jádra Slunce tvoří ze Slunce obrovskou rozžhavenou kouli. Teplota na povrchu Slunce se pohybuje kolem  $6\,000^\circ\text{C}$  a uvnitř jádra sahá až k  $14\,000\,000^\circ\text{C}$  [13]. Část energie vzniklé ve Slunci se do okolí uvolňuje ve formě elektromagnetického záření, které se dále šíří prostorem všemi směry. Je obecně známo, že záření putuje ze Slunce na Zemi zhruba 8 min 20s a za tuto dobu musí zdolat vzdálenost 150 mil. kilometrů.

Na Zemi dopadá jen nepatrné procento z celkového množství vyzářené energie Sluncem. Toto záření je oslabeno průchodem sférickými vrstvami (odraz, absorpce) a na samotný zemský povrch dopadá záření o energii přibližně  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Bohužel ani tak nelze využít plný potenciál dopadajícího záření. Sluneční záření obsahuje spoustu fotonů o různých energiích, které jsou reprezentovány jejich vlnovou délkou a jen část z nich je využitelná ve fotovoltaice. Při fotovoltaických procesech lze využít jen takové záření, jehož energie je větší, než je energie potřebná k uvolnění elektronu z vazby (viz kapitola č. 2).



Obrázek č. 1: Spektrum slunečního záření [24]

Obrázek č. 1 nám ukazuje spektrum slunečního záření dopadajícího na zemský povrch a jeho energetickou hodnotu. Záření s menší vlnovou délkou má větší energii a absorpční hrana nám udává, kdy je ještě záření využitelné ve fotovoltaice.

## 1.2. Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev byl poprvé popsán Albertem Einsteinem roku 1905. O několik let později, roku 1922, za tento objev získal Nobelovu cenu. Einstein zjistil, že pokud na polovodič dopadá světlo, vytvoří se na jeho koncích elektrický náboj. Tento elektrický náboj je důsledkem pohybu páru elektron-díra. Muselo tak dojít ke generaci páru elektron-díra.

Fotoelektrický jev je tedy fyzikální jev, kdy látka absorbuje dopadající elektromagnetické záření a dojde k uvolnění elektronu z valenčního pásu. Pokud je uvolněný elektron emitován do okolí, hovoříme o vnějším fotoelektrickém jevu. Naopak, pokud elektron zůstává v látce, hovoříme o vnitřním fotoelektrickém jevu [7]. Energii dopadajícího záření  $E$  popisuje vztah (1)

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

E.....Energie záření

H.....Planckova konstanta

f.....Frekvence dopadajícího záření

Energie záření závisí pouze na jeho frekvenci, respektive vlnové délce, nikoli na intenzitě. Pokud je energie dopadajícího záření větší než ionizační energie  $E_i$ , dojde k uvolnění elektronu z vazby. Aby elektron mohl opustit látku, musí vykonat určitou práci. Tato práce bývá označována jako výstupní práce  $W_v$ . Energie potřebná k uvolnění elektronu z látky je tedy dána vztahem (2)

$$E = h \cdot f_0 + W_v \quad (2)$$

E.....Energie záření

$h \cdot f_0$ .....Energie  $E_i$  potřebná k uvolnění elektronu z vazby

$W_v$ .....Výstupní práce

Pokud  $E_i < E < W_v$ , nastává vnitřní fotoelektrický jev

Pokud  $E > E_i + W_v$ , nastává vnější fotoelektrický jev

Pokud  $E < E_i + W_v$ , nenastává fotoelektrický jev

Pro křemíkové (Si) fotovoltaické články je energie potřebná k uvolnění elektronu rovna šířce zakázaného pásu, tedy 1,1eV. Pro arsenid galiové (AsGa) články je to energie 1,4eV.

### 1.3. Fotovoltaický článek

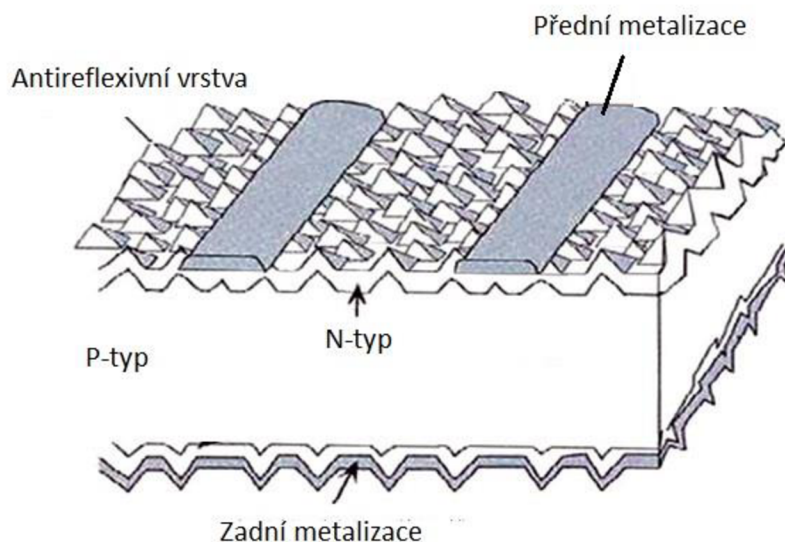
Většina dnešních FV článků je založena na křemíkové struktuře. Křemík je skutečně vhodný materiál pro výrobu solárních článků, protože z hlediska šířky zakázaného pásu je u křemíku možné dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů a navíc většina technologických operací zpracování křemíku je dobře zvládnuta [2].

#### 1.3.1. Přechod P-N

Křemík má ve své valenční vrstvě čtyři elektrony. Přidáme-li do křemíku příměs v podobě třímocného prvku, bude chybět jeden elektron k vytvoření kovalentní vazby mezi těmito atomy a ve valenční vrstvě vznikne takzvaná díra. Příměsi tvořící polovodič **typu P** (positive) nazýváme **akceptory** a nejčastěji se jedná o bor nebo hliník. Příměs v podobě pětímocného prvku způsobí přebytek elektronů - vzniká polovodič **typu N**. Příměsi tvořící N polovodič nazýváme **donory** a běžně se využívá pro tyto účely fosfor.

Spojíme-li polovodiče typu P a N k sobě, vzniká přechod P-N. Na rozhraní přechodu volné elektrony difundují ze záporně nabitě N vrstvy do vrstvy P. Narazí-li elektron na díru, nastane rekombinace, tj. zánik páru elektron-díra. Vrstva přechodu se rozrůstá až do určité šířky a postupně brání dalšímu pronikání elektronů. Jelikož se v této vrstvě nenachází žádný vodivý element, chová se jako bariéra a je nazývána jako depletiční (vyprázdněná) vrstva.

#### 1.3.2. Struktura FV



**Obrázek č. 2:** Struktura fotovoltaického článku [1]

Fotovoltaické články jsou přechody P-N. Na křemíkové destičce polovodiče typu P je leptáním vytvořena textura pyramidového tvaru, na kterou je v difúzních pecích nanášena tenká vrstva polovodiče typu N. Vrstva N je ve srovnání s vrstvou P několikanásobně krát tenčí a díky tomu kopíruje vyleptaný tvar vrstvy P. Pyramidový tvar je jen jednou z variant povrchové úpravy. Obecně ale platí, že tyto úpravy mají velký vliv na odrazivost slunečního

záření a značně se podílí na budoucí účinnosti fotovoltaického článku. Při osvětlení N vrstvy dojde k vnitřnímu fotoelektrickému jevu a ke generaci volných nosičů. Jelikož depletiční vrstva brání volným nosičům v průchodu do polovodiče typu P a k následné rekombinaci, hromadí se volné nosiče v polovodiči typu N. Mezi jednotlivými vrstvami lze naměřit napětí, tzv. prahové napětí  $U_p$ , které se pohybuje u křemíkových článků kolem 0,5 voltů.

Na vrchní stranu článku (na polovodič typu N) je nanášena antireflexivní vrstva (NITRID), která společně s tvarem povrchu snižuje odrazivost. Tloušťka antireflexivní vrstvy udává mimo jiné i barvu povrchu (modrý, zelený, zlatý). Nejčastěji používaná tloušťka činí 80nm, což odpovídá modré barvě.

Metalizace se nanáší na antireflexivní vrstvu metodou sítotisku a za vysokých teplot se zapouští až do samotné křemíkové struktury. Většinou se jedná o hustou síť na zadní neosvětlené straně a tenké prsty na přední straně (sběrnice) [16]. FV články se zapojují sériově pro zvětšení napětí nebo paralelně pro zvětšení protékajícího proudu.

## 1.4. Typy fotovoltaických článků

### 1.4.1. Monokrystalické

Monokrystalické články se vyznačují jednotným uspořádáním atomů křemíku se stejnou orientací v celém objemu. Výroba těchto článků bývá složitá a energeticky náročná. Běžnou metodou pro výrobu monokrystalického křemíku je tzv. **Czochralského metoda**. Tato metoda spočívá v tom, že se do křemíkové taveniny ponoří zárodečný krystal, který definuje budoucí orientaci atomů vykrytalizovaných na tomto zárodku. Za přísných podmínek se tento zárodečný krystal vytahuje do tyčí (ingotů), které mohou mít průměr až 300mm a délku 2m. Tyto ingoty se následně rozřežou na plátky o tloušťce 0,25 až 0,35mm. Účinnost monokrystalických článků se pohybuje v rozmezí 14 až 18% a jejich vhodné užití je **na místech s přímým, kolmým osvětlením** (např. sledovače, které sledují polohu slunce) [15].



Obrázek č. 3: Monokrystalický (vlevo) a polykrystalický článek [9]

### 1.4.2. Polykrystalické

Polykrystalické články obsahují větší množství nahodile orientovaných zrn. Jsou obecně méně účinné než monokrystalické a jejich účinnost se pohybuje kolem 12 až 15%. Polykrystalické články se vyrábí odléváním čistého křemíku do speciálních forem

čtvercového nebo obdélníkového tvaru. Výsledný ingot se opět rozřeže a je připraven k dalšímu zpracování. Kvůli menší technologické náročnosti jsou tyto články zpravidla levnější. Jejich použití je vhodné v místech s rozptýleným světlem.

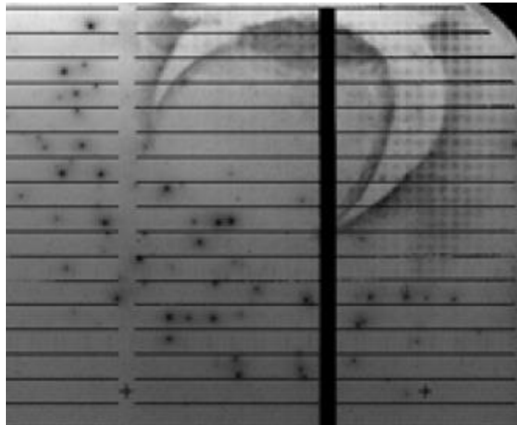
### **1.4.3. Amorfní**

Amorfní články jsou v porovnání s monokrystalickými a polykrystalickými články znatelně levnější, výroba je totiž méně materiálově a energeticky náročná. Nevýhodou těchto článků je jejich malá účinnost (5-9 %) [10].

## **1.5. Defekty fotovoltaických článků**

I přestože je technologie zpracovávání křemíku na vysoké úrovni, v praxi se často setkáváme s mnohými nežádoucími defekty, které nepříznivě ovlivňují účinné fungování článků. Defekty můžeme rozdělit na materiálové, které vznikají již při výrobě samotné křemíkové struktury, a výrobní, vznikající špatným zacházením nebo nedodržováním výrobních pravidel. V následujících podkapitolách lze shlédnout snímky nejběžnějších defektů.

### **1.5.1. Nehomogenní difúzní vrstva**



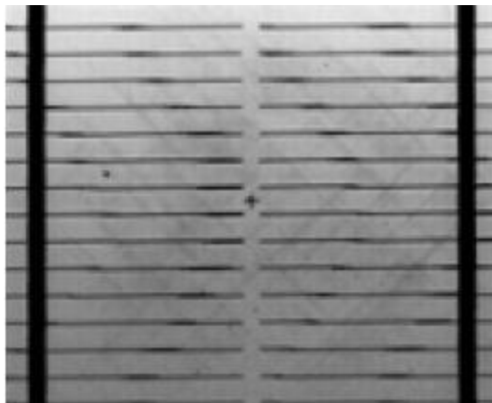
**Obrázek č. 4:** Nehomogenní difúzní vrstva [9]

Obrázek výše zobrazuje defekt nehomogenní difúzní vrstvy. Tento defekt vzniká v difúzních pecích, kdy se vytváří tenká vrstva polovodiče v substrátu. Jedná se o výrobní defekt.



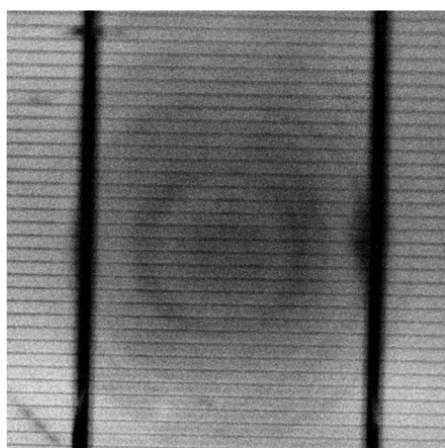
### **1.5.2. Vnitřní pnutí**

Snímek č. 5 demonstruje defekt vnitřního pnutí. Jedná se o materiálový defekt, který vzniká při špatně řízené výrobě křemíkového ingotu pomocí Czochralského metody. Obecně materiálové defekty ovlivňují větší množství článků a jsou značně nežádoucí.



**Obrázek č. 5:** Detail vnitřního pnutí [9]

### **1.5.3. Vírový defekt**

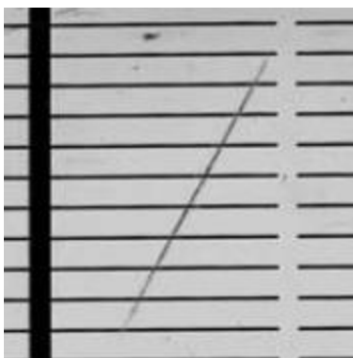


**Obrázek č. 6:** Vírový defekt (swirl)

Vírový defekt je materiálový defekt, který vzniká při rotačním pohybu ingotu, kdy příměsi kyslíku ve fázi táhnutí a tuhnutí difundují do struktury monokrystalu křemíku.

#### **1.5.4. Mechanické poškrábání**

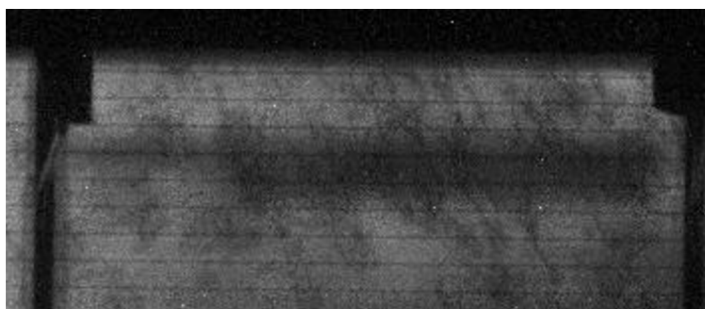
Mechanické poškrábání je výrobní defekt, který vzniká nevhodným zacházením s článkem.



**Obrázek č. 7:** Mechanické poškrábání [21]

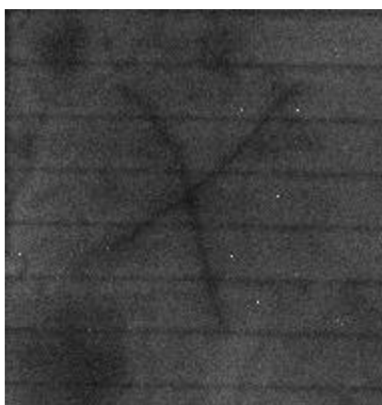
#### **1.5.5. Nedokonalé kontaktování**

Nedokonalé kontaktování je výrobní defekt, kdy metalizace nepronikla pasivační vrstvou do křemíkové struktury a nevytvořila tak vodivý kontakt.



**Obrázek č. 8:** Nedokonalé kontaktování (finger)

#### **1.5.6. Mikroprasklina**

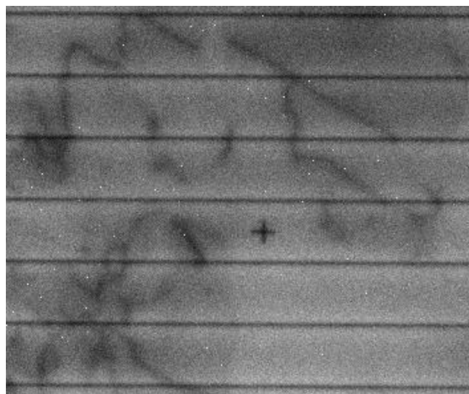


**Obrázek č. 9:** Mikroprasklina

Defekt mikropraskliny vzniká špatně řízeným technologickým postupem (teplota) a nevhodných mechanickým zacházením.

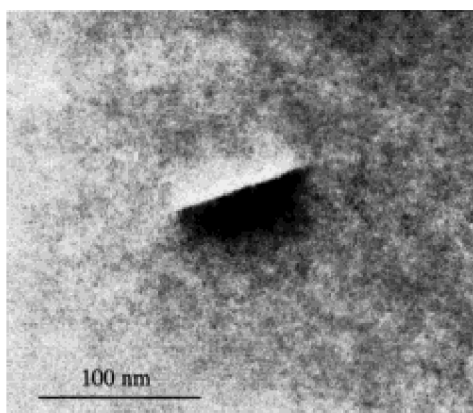
### **1.5.7. Dislokace v polykrystalickém křemíku**

Dislokace jsou jedním z hlavních faktorů ovlivňující účinnost polykrystalických článků. Zaujímají velké procento plochy článku a způsobují zvýšenou rekombinaci minoritních nosičů v dané oblasti. Zvýšená rekombinace je způsobena zvýšeným počtem rekombinačních center a zkrácením tak životnosti nosičů [3].



**Obrázek č. 10:** Dislokace

### **1.5.8. Kyslíkové precipitáty**



**Obrázek č. 11:** Detail kyslíkového precipitátu [18]

Kyslíkové precipitáty vznikají během tuhnutí krystalu křemíku a shlukují se v blízkosti dislokací. Výzkum v posledních letech prokázal, že kyslíkové precipitáty jsou schopny vázat na sebe metalické nečistoty, které značně podporují rekombinační děje v dislokacích [18].

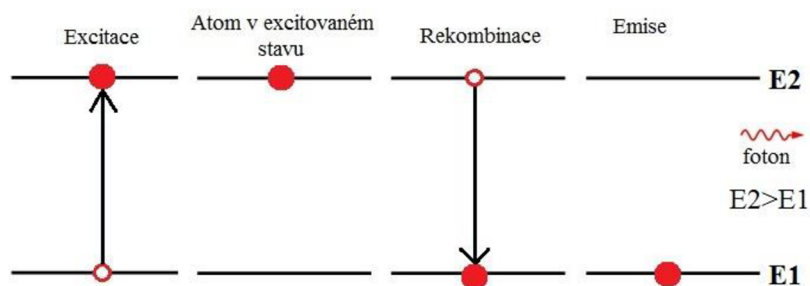
## 1.6. Luminiscence

Luminiscence může být definována jako **spontánní záření**, které představuje přebytek nad teplotním zářením. Je charakterizováno dozníváním, jehož trvání značně převyšuje periodu světelných kmitů.

### 1.6.1. Mechanizmy luminiscence

Luminiscenční záření je jistý druh světelného vyzařování excitovaných systémů, jako jsou atomy, molekuly, ionty nebo složitější soustavy. Již z tohoto poznatku je jasné, že luminiscence musí probíhat v několika fázích:

- **Excitace (vybuzení)** – Je to proces, kdy dochází k excitaci (převedení) některých elektronů do vyšších energetických stavů v důsledku pohlcení určitého kvanta energie.
- **Přenos energie** – Dochází k přesunu energie mezi absorpčním a luminiscenčním centrem.
- **Vyzáření energie** – Děj, kdy dochází k vyzáření fotonů z luminiscenčního centra, které může, ale nemusí, být totožné s absorpčním centrem.



Obrázek č. 12: Mechanizmy luminiscence

Rozlišujeme dva základní typy způsobů excitace luminiscenčních center:

- **Nerekombinační luminiscenci** – V tomto případě nedochází k ionizaci luminiscenčního centra. K excitaci dochází změnou elektronové konfigurace v energetickém systému.
- **Rekombinační luminiscenci** – Dochází k vytvoření páru elektron-díra.

Aby se látka mohla klasifikovat jako luminiscenční, musí splňovat tuto podmínku: V látce musí existovat systém diskrétních energetických hladin, mezi nimiž mohou elektrony přecházet, přičemž rozdíl energií mezi těmito stavy musí být takový, aby při přechodu elektronu z vyššího stavu do nižšího stavu byl vyzářen foton z viditelné oblasti spektra, popřípadě blízkých oblastí spektra [6]. Většinou se jedná o pevné látky, které nazýváme **luminofory**, nebo plynné látky (Na, He, Ne, Bi).

### **1.6.2. Rozdělení luminiscence podle způsobu buzení a trvání**

Podle způsobu, jakým dodáváme látce energii potřebnou k excitaci atomů, rozdělujeme luminiscenci na několik druhů [14]:

- **Fotoluminiscence** – Dodávání energie luminoforům ve formě fotonů o různých vlnových délkách. Luminofory tuto energii pohltní a posléze vyzáří zpět, zpravidla o něco menší.
- **Katodoluminiscence** – Ostřelování luminoforů elektrony s určitou kinetickou energií. Při srážce elektrony předají část své energie luminoforům.
- **Elektroluminiscence** – Luminiscence je způsobena přiloženým napětím.
- **Chemoluminiscence** – Luminiscenční záření je důsledek chemických reakcí.
- **Bioluminiscence** – Důsledek biochemických reakcí v živých organismech (světlušky, medúzy, ryby).
- **Termoluminiscence** – Vyzáření absorbovaného záření, když je materiál dostatečně zahřátý.
- **Mechanoluminiscence** - Vzniká při mechanické deformaci.
- **Radioluminiscence** – Vzniká při působení ionizujícího záření.
- **Sonoluminiscence** – Vzniká působením mechanických kmitů.

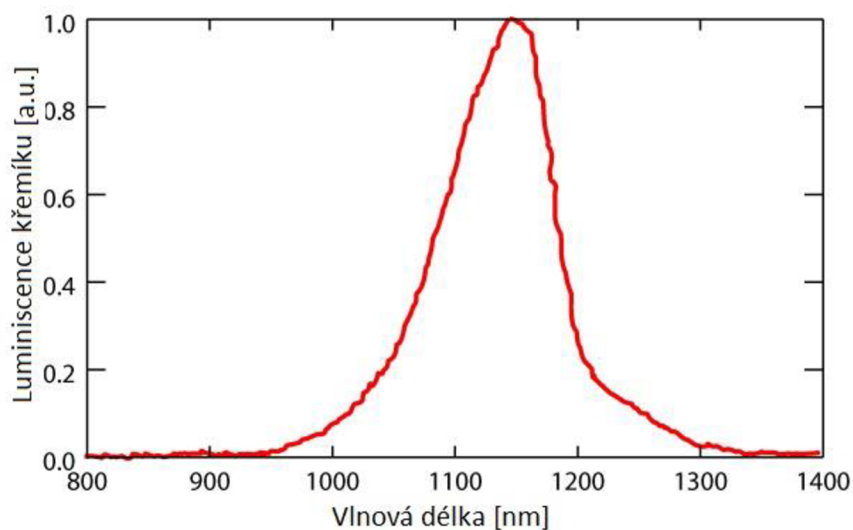
Luminiscenci můžeme také rozdělit podle doby, kdy je luminiscenční záření zaznamatelné:

- **Fluorescence** - Luminiscenční záření zmizí téměř ihned po odpojení zdroje excitace elektronů. Doba, kdy je luminiscence pozorovatelná, se pohybuje kolem  $10^{-8}$  s.
- **Fosforescence** - Excitované elektrony přechází v metastabilní hladiny a luminiscenční záření setrvává i několik minut po odpojení zdroje.

### **1.6.3. Elektroluminiscence křemíku**

Elektroluminiscence využívá stejného principu jako LED diody. Tato metoda vyžaduje elektrický kontakt, proto se dá použít pouze po provedení metalizace. Na křemíkovou strukturu je přivedeno napětí, díky němuž začne strukturou procházet elektrický proud. Elektrony procházející strukturou rekombinují s volnými dírami a energie uvolněná při rekombinaci je vyzářena. Pro měření touto metodou je nutné znát vyzářovací spektrum, jelikož by zvolený detektor nemusel být citlivý v námi požadovaném spektru.

Na obrázku č. 13 lze vidět spektrum záření křemíku. Vlnové délky nabývají hodnot od 950nm do 1350nm s maximem kolem 1150nm.



Obrázek č. 13: Vyzařovací spektrum Si [10]

#### 1.6.4. Vlastnosti luminiscenčního záření

Luminiscenční záření můžeme najít v přírodě v různých podobách. Typickými představiteli jsou světlušky, které díky luminiscenci za tmy světluší. Obdobně křemík za určitých podmínek vyzařuje jisté záření, které ale není pro lidské oko viditelné.

V obou případech se ale jedná o elektromagnetické záření, které má své charakteristické vlastnosti, jako například [16]:

- **Intenzita** - počet fotonů procházejících v daném směru jednotkovou plochou za jednotku času
- **Spektrum**- spektrální hustota fotonového toku na jednotkový interval vlnových délek nebo frekvencí
- **Koherence** - dána vztahy mezi fázemi světelných vln
- **Doba trvání** - je dána vnitřní dobou života excitovaného stavu, z něhož dochází k emisi
- **Polarizace** - směr kmitání elektrického vektoru elektromagnetické vlny

### 1.7. Polarizace

Světlo je elektromagnetická vlna a je charakterizována dvěma neustále kmitajícími vektory - vektor elektrického a magnetického pole. Oba vektory jsou na sebe kolmé a zároveň jsou kolmé na směr šíření vlny. Kmitají se stejnou frekvencí. Orientace této vlny je ale v prostoru i čase náhodná. Pod pojmem polarizace se rozumí usměrnění orientace a vytvoření z náhodného kmitání usměrněné kmitání.

### 1.7.1. Lineární polarizace

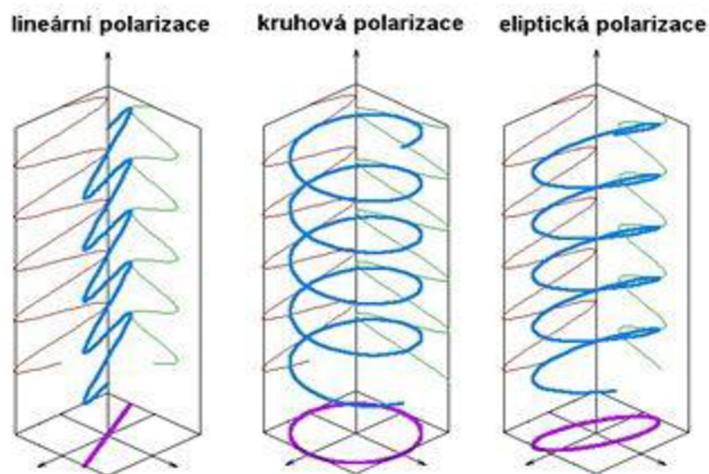
Lineární polarizace je nejjednodušší druh polarizace. Lineárně polarizovanou vlnu si lze představit jako vlnu kmitající pouze v jedné rovině, např. v rovině Y. Magnetická a elektrická složka lineárně polarizované vlny má stejnou počáteční fázi. Shodná frekvence obou složek tak způsobuje, že mají vždy stejný poměr amplitudy. To v praxi znamená, že se mění pouze amplituda výsledné elektromagnetické vlny, nikoli její směr [25].

### 1.7.1. Eliptická polarizace

Eliptická polarizace je nejrozšířenějším druhem polarizace. Při eliptické polarizaci mají vektory obou složek různé počáteční fáze a nerovnájí se  $90^\circ$ . Druhou příčinou eliptické polarizace jsou různé amplitudy jednotlivých složek. Při této polarizaci výsledná elektromagnetická vlna rotuje po elipse.

### 1.7.2. Kruhá polarizace

Kruhá polarizace je speciálním případem eliptické polarizace. Při kruhové polarizaci mají obě složky kmitání stejnou amplitudu, fázový rozdíl je ale přesně  $\pi/2$  radiánu ( $90^\circ$ ). Z toho vyplývá, že jedna složka nabývá svého maxima nebo minima, zatímco druhá je rovna nule. Amplituda výsledné elektromagnetické vlny je stále konstantní a rotuje po kružnici.



Obrázek č. 14: Druhy polarizace elektromagnetického záření [25]

### 1.7.3. Způsoby polarizace

Záření světla může být polarizováno několika způsoby. Mezi základní způsoby polarizace patří polarizace odrazem, lomem, dvojlomem a absorpcí [25].

- **Polarizace odrazem** - vzniká, když záření dopadá na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi. Platí zde zákon odrazu, který říká, že úhel

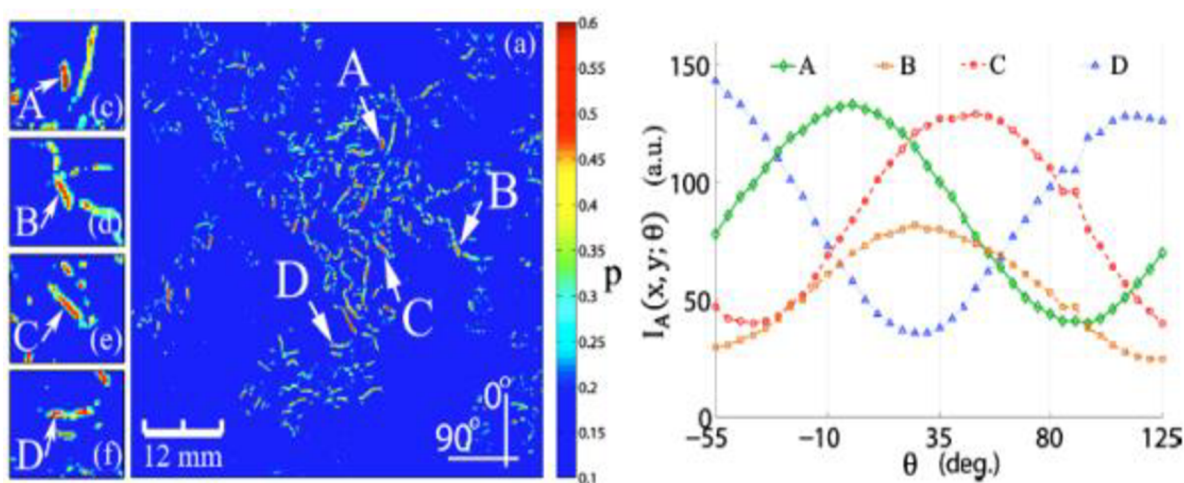


dopadajícího paprsku je roven úhlu paprsku odraženému. Tzv. Brewsterův úhel je úhel, při kterém je odražené vlnění plně polarizováno. Kmity jsou v tomto případě kolmé na plochu rozhraní. Pro různé látky se velikost Brewsterova úhlu liší.

- **Polarizace lomem** - nastává společně s polarizací odrazem. Při dopadu na rozhraní se část záření odráží a část záření se láme. Většina kmitů leží v rovině dopadu.
- **Polarizace dvojlomem** - vzniká u anizotropních látek, kde je rychlost šíření vlnění závislá na směru. Při dopadu záření na takové látky dojde k vytvoření dvou paprsků. Paprsek řádný, který splňuje zákon odrazu a lomu, a paprsek mimořádný, který vznikl v důsledku anizotropie látky. Oba tyto paprsky jsou plně polarizovány a jejich vektory  $E$  jsou navzájem kolmé.
- **Polarizace absorpcí** - vzniká, pokud látka obsahuje dostatečně dlouhé molekuly, které jsou natočeny v jednom směru. Takto natočené molekuly vytváří filtr, který propustí jen kmity, které jsou ve shodném natočení jako molekuly látky. Záření dopadající v jiném směru než orientace molekul je absorbováno.

#### 1.7.4. Polarizace luminiscenčního záření defektu dislokace

Matthew P. Peloso ve své práci uvádí značnou polarizační závislost luminiscenčního záření čárového defektu dislokace. Ve 4 bodech, které reprezentují natočení čáry defektu vůči rovině polarizačního filtru ( $A=0^\circ, B=30^\circ, C=50^\circ, D=90^\circ \pm 5^\circ$ ), byla měřena míra polarizace.



**Obrázek č. 15:** Pohled na polarizované oblasti (vlevo), graf závislosti intenzity na pootočení filtru (vpravo) [20]

Ve svém bádání přišel na to, že polarizace nabývá svého maxima v úhlu, který koresponduje se směrem natočení čáry defektu. Příčinu polarizace shledává v anizotropickém charakteru defektu [20].



## **1.8. Vybrané diagnostické metody**

### **1.8.1. Elektroluminiscence**

Elektroluminiscence je diagnostická metoda sloužící ke zjištění materiálových, elektrických i optických vlastností článku. Jedná se o velmi rychlou metodu, kdy je na článek přivedeno napětí a proud v propustném směru. Elektrické nosiče průchodem článku rekombinují a část energie se vyzáří. Při využití vhodného detektoru lze zaznamenat mapy proudové hustoty článku, ze kterých lze vysledovat nejrůznější defekty. Snímky jsou zobrazeny v odstínech šedi a obecně místa s vyšší proudovou hustotou jsou světlá, naopak defekty jsou reprezentovány tmavším odstínem. Výsledky jsou srovnatelné i s jinými, časově mnohem náročnějšími metodami, jako jsou například LBIC (Light Beam Inducted Current) nebo LBIV (Light Beam Inducted Voltage) [9].

### **1.8.2. Fotoluminiscence**

Fotoluminiscence je metoda velice podobná elektroluminiscenci. Rozdíl mezi elektroluminiscencí a fotoluminiscencí je ve zdroji buzení záření. Zatímco v případě elektroluminiscence je záření buzeno přiloženým napětím, respektive procházejícím proudem, fotoluminiscence využívá pro buzení atomů jiné záření, nejčastěji UV záření. Na detektoru je přiložen filtr za účelem ořezání nežádoucí složky snímaného spektra, aby ve výsledku zbylo jen ono luminiscenční záření.

### **1.8.3. Záření mikroplazmy**

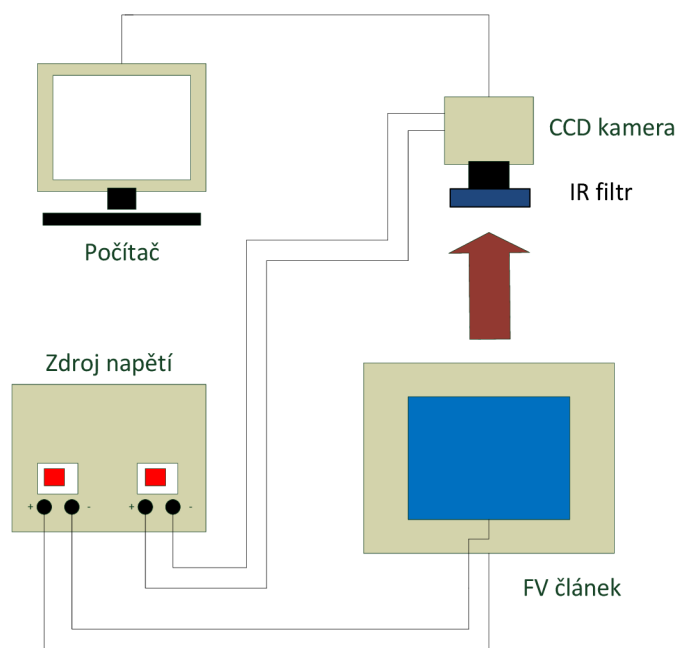
Tato metoda je opět velice podobná měření pomocí elektroluminiscence. Rozdíl je v připojení článku v závěrném směru. Záření vzniká v místech, kde je krystalická mřížka nehomogenní a na výsledných mapách jsou tyto defekty zobrazeny jako jasně zářící body. Při měření touto metodou je nutné dávat pozor, aby nedošlo k poškození článku při vyšších hodnotách závěrného napětí [9].

## 2 Praktická část

Cílem práce bylo prozkoumat reprezentativní skupinu polykrystalických fotovoltaických článků základní metodou elektroluminiscence. Pro následné měření s polarizačním detektorem bylo nutné vyrobit nosnou konstrukci pro filtr a z naměřených dat vybrat vhodný vzorek. Metoda elektroluminiscence byla dále rozšířena o polarizační analýzu a naměřená data z měření s polarizačním filtrem byla zpracována v programu MATLAB pomocí různých metod.

### 2.1. Měřicí pracoviště

Pro zvýšení kvality vyhodnocení měření elektroluminiscence je jedním ze základních požadavků zamezit přístup viditelného spektra k diagnostikovanému článku. FV články byly umístěny do temné komory (uzavíratelný plechový box) s instalovanými kontaktními svorkami na dně. Svorky byly připojeny na zdroj proudu a napětí DIAMETRAL P230R51D. Články byly napájeny v propustném směru proudem o velikosti 2A při různém napětí. Velikost odebíraného napětí se lišila v závislosti na zvoleném článku, nikdy však nebylo překročeno výkonové zatížení článku 6W.

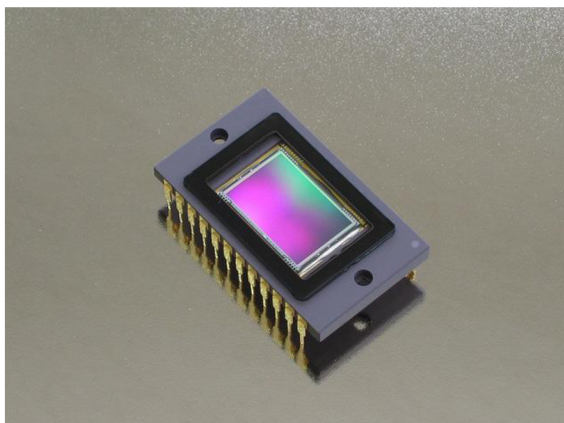


**Obrázek č. 16:** Schéma zapojení pracoviště

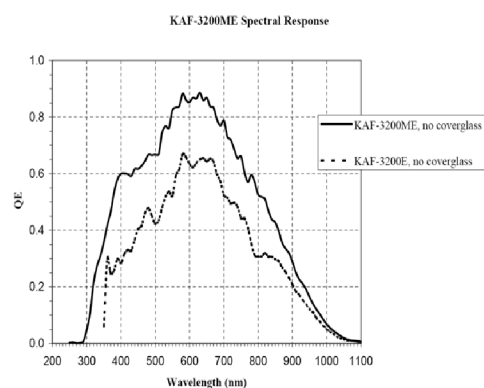
Na objektiv CCD (Charge-coupled device) kamery byl namontován IR filtr a celý objektiv kamery byl prostrčen kruhovým výřezem na vrchní straně boxu. Stejným zdrojem, kterým byl napájen článek, byla napájena také kamera. Čip CCD kamery byl chlazený termoelektricky na teplotu  $-20^{\circ}\text{C}$ , aby se snížil vliv tepelného šumu. Celá kamera byla chlazená větráčkem. Naměřená data byla posílána do počítače pomocí USB 2.0 portu a následně zpracována pomocí nainstalovaného programu SIMS.

## 2.2. CCD kamera

Pro měření elektroluminiscenčního záření byla využita CCD kamera typu G2 – 3200 s chlazeným čipem KAF-3200ME od firmy Kodak. Ke kameře je připojen 58mm objektiv od firmy Canon, který zajišťuje nastavitelné přiblížení a zaostření obrazu. Hlava kamery obsahuje veškerou elektroniku, závěrku a filtrové kolo s 5 filtry, které se dají softwarově nastavit. Účinné chlazení dokáže nastavit teplotu až o 50°C nižší, než je teplota okolí. Kamera je napájena 12V stejnosměrného napětí. Rozlišení pořízených snímků je 3,2MPx (2184 x 1472). Tyto CCD kamery našly široké uplatnění v oblastech astronomického výzkumu, mikroskopie a materiálového inženýrství a astrofotografie [4].



Obrázek č. 17: CCD čip KAF-3200ME [4]



Obrázek č. 18: Spektrální citlivost CCD [4]



Obrázek č. 19: CCD kamera [4]

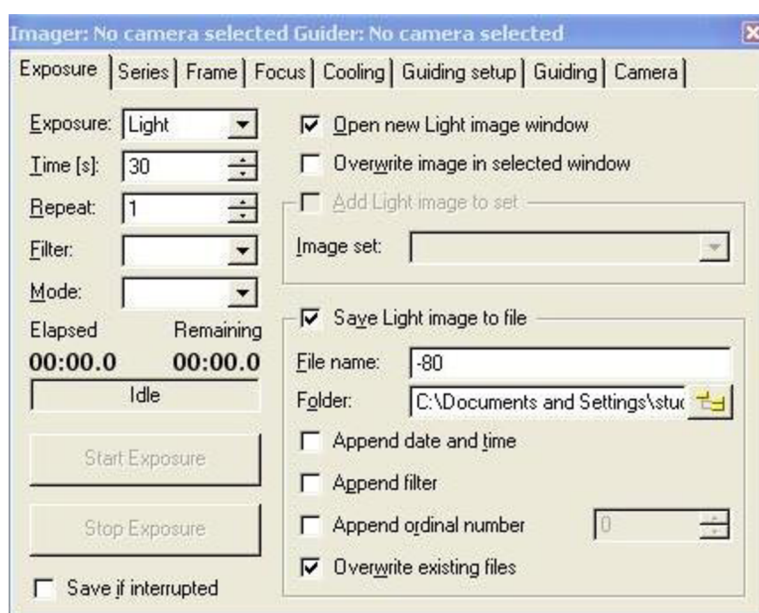
Kamera má řadu charakteristických vlastností, jako jsou např.:

- Vysoká citlivost se špičkovou kvantovou účinností přes 80%
- Nejnižší možný čtecí šum limitovaný pouze vlastním CCD čipem
- Vysoký dynamický rozsah s 16 bitovou digitalizací a lineární odezva
- Efektivní a precizně regulované chlazení s volitelným tepelným výměníkem pro vodní chlazení

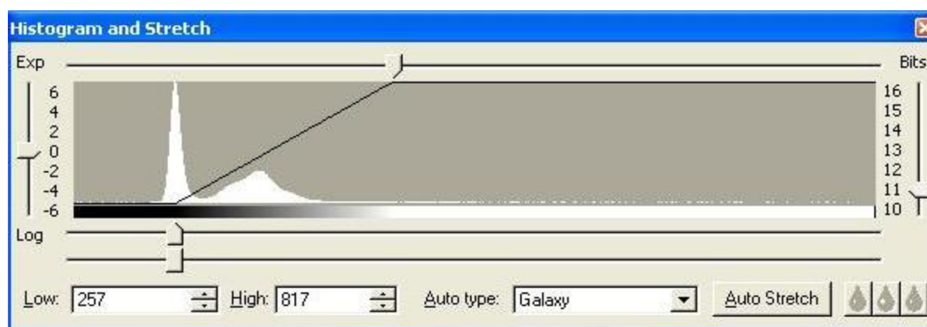
## 2.3. Program SIMS

SIMS (Simple Image Manipulation System) je softwarový balíček, který je specializován na ovládání CCD kamer. Kromě ovládání kamery má i řadu jiných funkcí, týkajících se převážně zpracování pořízeného obrazu, jako je kalibrace obrazu, nastavení RGB kompozice, histogram, nebo použití různých filtrů [11].

V záložce *Cooling* bylo možné pomocí tohoto programu regulovat chlazení CCD čipu na požadovaných  $-20^{\circ}\text{C}$ . V hlavní záložce *Exposure* se dalo nastavit místo uložení pořízeného obrazu, čas expozice a počet opakování. Mimo jiné, se zde dají nastavit i použité filtry, které jsou instalovány přímo v hlavě kamery. Stiskem tlačítka *Start Exposure* proběhne samotné snímání.



Obrázek č. 20: Obsluha kamery v programu SIMS



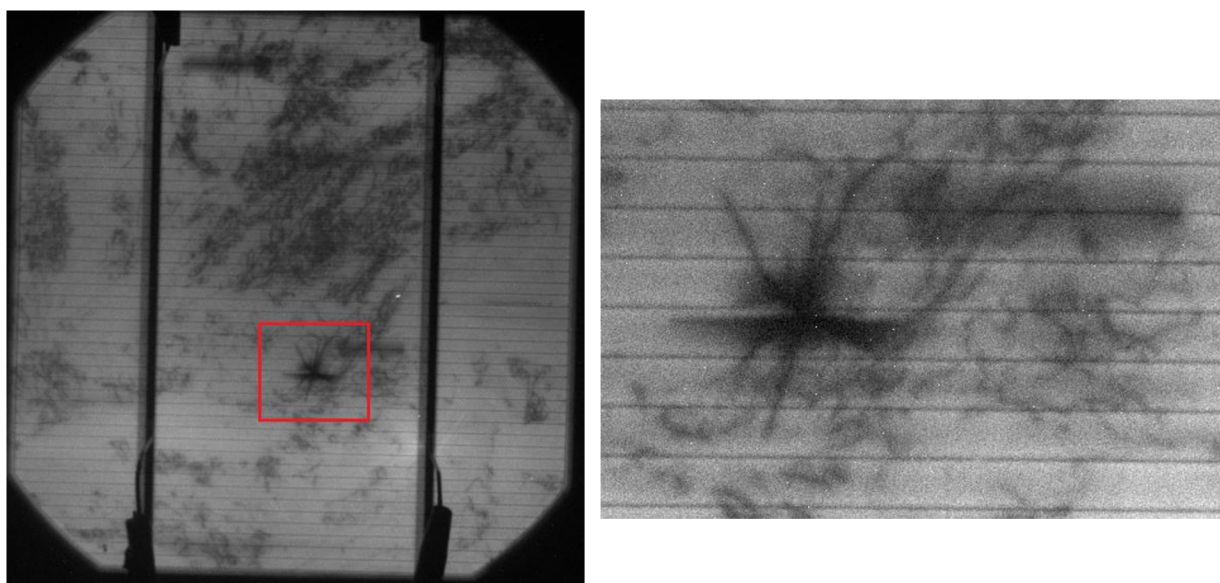
Obrázek č. 21: Histogram

Jediná úprava snímků byla provedena pomocí histogramu, díky němuž bylo možné z příliš tmavých snímků udělat snímky světlejší a lépe čitelné. Nutno podotknout, že všechny snímky byly upraveny stejnou mírou.

## 2.4. Měření polarizace luminiscenčního záření

### 2.4.1. Měření klasickou metodou elektroluminiscence

Pomocí této metody bylo proměřeno 15 polykrystalických fotovoltaických článků, které zapůjčila firma Solartec. Články se od sebe lišily barvou, resp. tloušťkou antireflexní vrstvy, povrchovou úpravou a velikostí. Z naměřených vzorků byl poté vybrán reprezentující vzorek obsahující defekt mikropraskliny pro analýzu s polarizačním detektorem. Předpokladem je, že by luminiscenční záření z oblasti defektu mohlo být polarizované vlivem lomu záření na defektu, respektive vlivem anizotropního prostředí v oblasti nejbližšího okolí defektu, které mohlo vzniknout v důsledku vzniku defektu. Vybraný vzorek spolu s detailem vybrané oblasti je na obrázku níže.



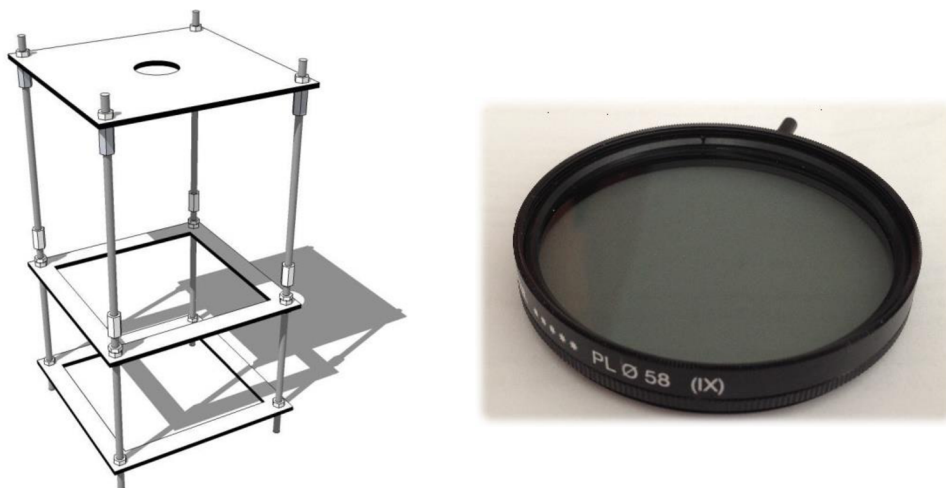
Obrázek č. 22: Vybraný vzorek pro detailnější analýzu; Detail vybrané oblasti

### 2.4.2. Měření s polarizačním detektorem

Měření s polarizačním detektorem má obdobné zapojení jako na Obrázek č. 16. Rozdíl je v přidání dalšího filtru. V první fázi byl polarizační filtr umístěn přímo na objektivu za IR filtrem. Výsledky ale nebyly příznivé, jelikož při každém pootočení filtru docházelo k rozostření optické soustavy a k mírnému posunu kamery a snímku. Proto byl do měřicí aparatury přidán další prvek v podobě nosné konstrukce, který oddělil polarizační filtr od objektivu kamery a vyřešil tak problémy s rozladováním.



Na následujícím obrázku je zobrazen vytvořený model konkrétní nosné konstrukce. Konstrukce se skládá ze dvou částí spojených závitovými spojkami uprostřed, aby ji bylo možné dostat do prostor plechového boxu, který je limitován vstupními dvířky. Každá část je tvořena ze závitových tyčí  $\varnothing$  7mm a dlouhých 24cm. Desky kostry jsou vytvořeny z materiálu sololit. Na horní desce je vyvrtán kruhový otvor  $\varnothing$  58mm a znázorněna stupnice 360°. Do tohoto otvoru je umístěn polarizační filtr. Spodní desky zajišťují celkovou stabilitu montáže. Fotovoltaický článek se nachází v čtvercovém výřezu spodní desky



**Obrázek č. 23:** Nosná konstrukce (vlevo); polarizační filtr (vpravo)

### **2.4.3. Měření pomocí lineárního a cirkulárního polarizačního filtru**

Vybraný vzorek byl proměřen oběma filtry. Při měření vyšlo najevo, že kamera má problémy se snímáním lineárně polarizovaného záření. Uvnitř kamery vznikaly při lomu na hranolu různé poměry toku záření, než na jaký je kamera zvyklá od nepolarizovaného záření. Tyto poměry závisely na orientaci polarizace záření a způsobovaly tak mírné posunutí obrazu na detektoru. Cirkulární filtr tento problém odstraňuje. Na výstupu cirkulárního filtru je fólie, která polarizované záření po průchodu filtrem depolarizuje. Oba filtry tak filtrují lineárně polarizované záření, rozdíl je v orientaci výstupního záření.

Na obvodu filtru je pacička, kterou lze nastavovat orientaci polarizační roviny. Krok pootáčení filtru byl pro lineární filtr  $10^\circ$ , pro cirkulární filtr jemnějších  $5^\circ$ . Měření proběhlo v rozsahu  $180^\circ$ . Z lineárního charakteru by byla další měření zbytečná, protože by se opakovala (v jiné polaritě).

Intenzita polarizovaného záření na pořízených snímcích by se měla měnit v závislosti na orientaci filtru.

## 2.5. Analýza v MATLAB

### 2.5.1. IR\_view

Analýza v MATLAB byla provedena pomocí skriptu IR\_view. Jedná se o velice komplexní a složitý skript, který je určen pro zobrazování a zpracovávání IR snímků z nedestruktivních testování, převážně z oblasti tepelných testů. Pro analýzu intenzity záření je ale dostačující. Skript lze nalézt na webových stránkách kanadské univerzity Laval [23].

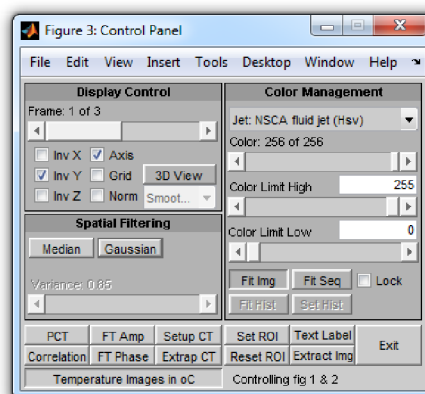
Program pracuje s maticí dat. Před spuštěním skriptu je tedy potřeba převést snímky do matice čísel. Každý pixel snímku je převeden na číselnou hodnotu. Barvy se převádí na základě RGB kódu, a protože se pracuje jen s černobílými snímky, k převedení postačuje jedno číslo. Černé barvě je přiřazen index 0. Hodnota 0 znamená, že všechny složky RGB budou mít hodnotu 0. Bílé barvě je přiřazen index 255, tedy všechny složky RGB mají hodnotu 255.

Skript dokáže pracovat s vícevrstevnými maticemi (3D matrix). Tato funkce může přijít vhod, pokud jsou data uložena v podobě video sekvence nebo sledu více snímků, jako je například formát .gif. Naše snímky převedené do matice jsou ale dvourozměrné. Pro efektivnější práci je žádoucí převést tyto 2D matice do jedné 3D matice, jinak by bylo nutné pro každý snímek skript spouštět znovu. Tento úkon lze provést příkazem CAT.

Př.:

```
>>A= [2 4; 4 5] //vytvoření 2D matice A
>>B = [4 8; 7 9] //vytvoření 2D matice B
>>C= cat(3,A,B) //sloučení A a B do 3D matice, 3 značí požadovaný rozměr
C(:,:,1) = // výsledek
2 4
4 5
C(:,:,2) =
4 8
7 9
```

Po spuštění skriptu ir\_view s požadovanými daty v argumentu se zobrazí hlavní panel ovládání.

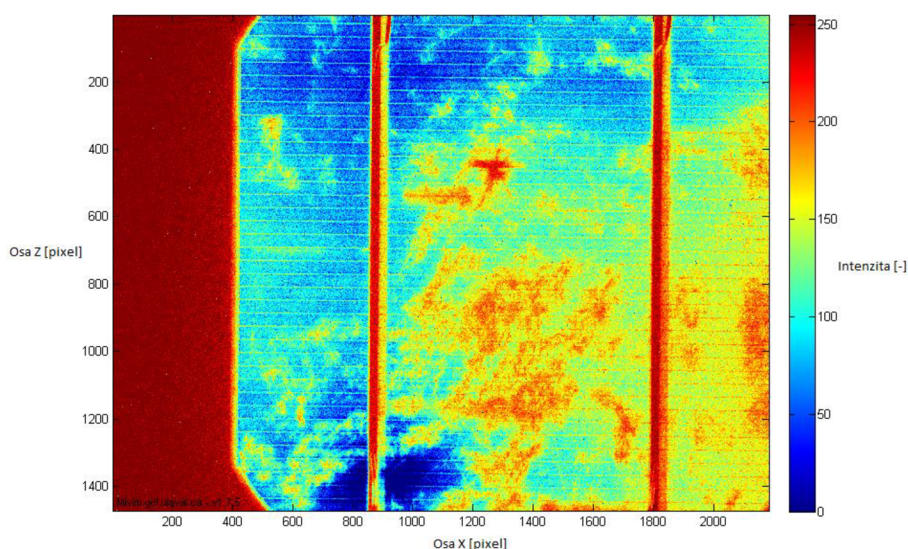


Obrázek č. 24: Ovládací panel skriptu IR\_view

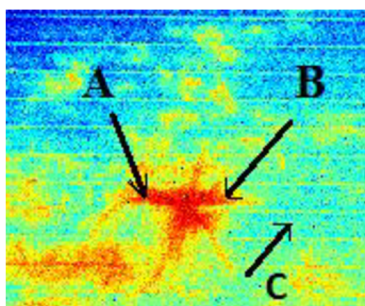
Zde je možné přepínat mezi jednotlivými snímky, respektive vrstvami matice. Funkce pro inverzi os je užitečná pro inverzi barev. Barvy jsou invertovány pro lepší odečítání peaků, kdy z tmavých oblastí vytvoříme oblasti světlé a v 3D zobrazení dosáhnou tyto oblasti nejvyšších hodnot. Skript disponuje také filtry (Median, Gaussian), které částečně eliminují šum a vytvoří tak spjitější vykreslení. Jelikož se ale jedná o určitou aproximaci, byly oba filtry vypnuty, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. V pravé části panelu lze nastavit limity stupnice, která v našem případě znázorňuje škálu intenzity.

### 2.5.2. Měření v bodech

Pořízené snímky z elektroluminiscence byly převedeny do programu a dále podrobeny analýze. Snímek po převedení do MATLAB je uveden níže. Osy X a Z (i pro snímky dále) značí rozměry snímku v pixelech, osa Y znázorňuje převedenou intenzitu na číslo. Na snímku je vidět invertované podání barev.



**Obrázek č. 25:** Elektroluminiscenční snímek zobrazen v MATLAB



**Obrázek č. 26:** Vybraná oblast s vyznačenými body měření

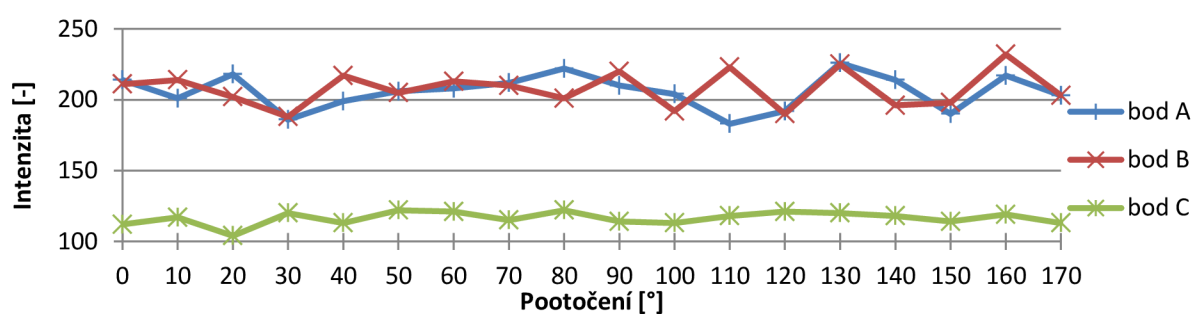
Ze snímků pořízených pomocí lineárního polarizačního filtru byla ve vybrané oblasti v několika bodech změřena intenzita záření v závislosti na pootočení filtru.



Naměřené hodnoty v jednotlivých bodech A, B a C jsou zaznamenány v tabulce č. 1 níže.

**Tabulka č. 1:** Naměřené hodnoty v bodech A, B, C

Úhel [°]	Intenzita [-]		
	A	B	C
0	214	211	112
10	201	214	117
20	218	202	104
30	186	188	120
40	199	217	113
50	206	205	122
60	208	213	121
70	212	210	115
80	222	201	122
90	210	220	114
100	204	192	113
110	183	223	118
120	192	190	121
130	226	225	120
140	214	196	118
150	190	198	114
160	217	232	119
170	203	203	113



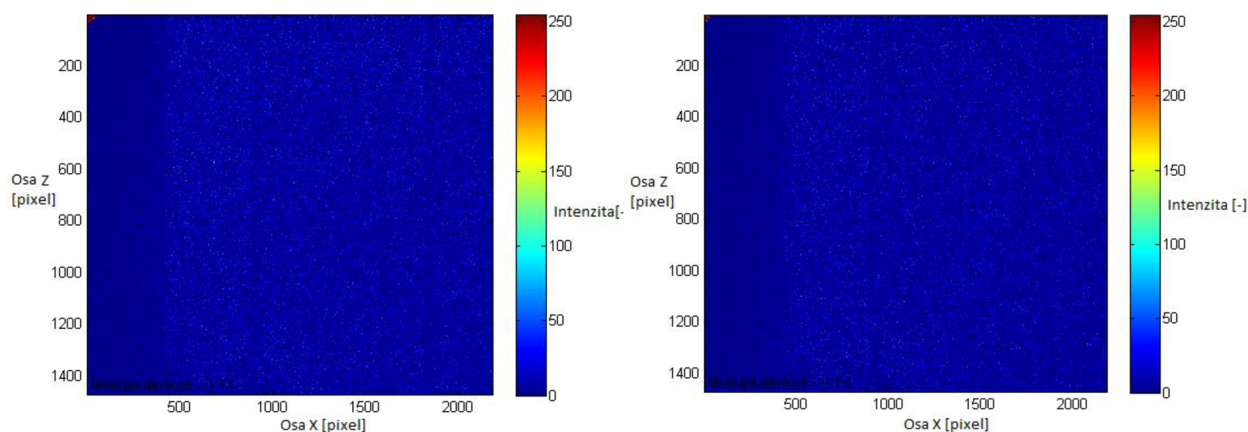
**Obrázek č. 27:** Graf závislosti intenzity záření na pootočení polarizačního filtru

V přiloženém grafu lze zaznamenat jisté změny intenzity záření v bodech A a B v porovnání s bodem C. Tento průběh ale nemá pravidelný sinusoidní charakter. Spíše nepravidelně osciluje kolem konstantní hodnoty. Můžeme tedy zatím předpokládat, že žádná polarizace v těchto bodech nebyla prokázána. Bod C slouží k možnému porovnání oblasti s defektem a bez defektu.

### 2.5.3. Odčítací metoda

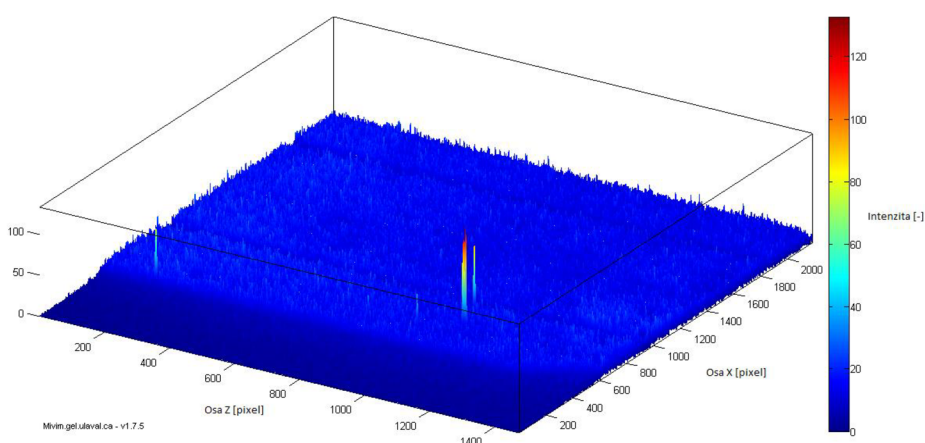
Jak již bylo zmíněno, snímky pořízené pomocí lineárního filtru byly lehce posunuté a vybírání pomocí kurzoru mohlo být mírně nepřesné. Při měření pomocí cirkulárního polarizačního filtru k žádnému posunu nedocházelo. Díky tomuto faktu lze navrhnout metodu odečtení snímků.

Jestliže v nějakém bodě článku dochází ke změnám vlivem pootočení filtru, bude se jeho číselná hodnota měnit. Tam, kde ke změnám nedochází, zůstává číselná hodnota stejná. Pokud tedy dva snímky od sebe odečteme, absolutní hodnota jejich rozdílu nám odhalí všechny změny, které po pootočení filtru nastaly. Výhodou oproti měření v bodech je celoplošná analýza.



Obrázek č. 28: Výsledek odčítání snímků pro  $10^\circ$  a  $110^\circ$

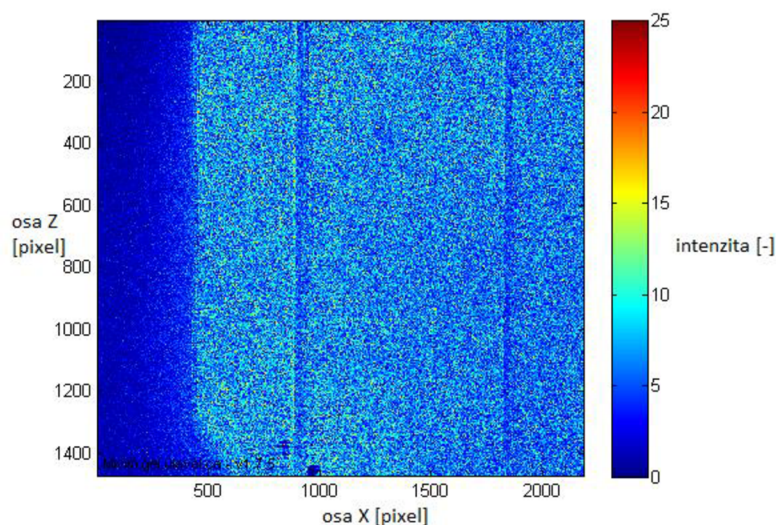
Jako referenční snímek byl použit snímek s natočením polarizačního filtru  $0^\circ$ . Po provedení odečtení je na snímcích vidět obrys článku. Obrys vznikl v důsledku odečtení šumu, kdy nelze zaručit shodné hodnoty.



Obrázek č. 29: 3D analýza

Převedením snímků do 3D lze vidět detailní pohled na odečtenou plochu. Výběžek vzniklý ve spodní části článku je výsledkem odečtení bílé skvrny vzniklé při měření článků pomocí elektroluminiscence.

Na obrázku č. 30 je ještě jednou zobrazen výsledný snímek po provedení odečtení, tentokrát se zvýšenou citlivostí. Velikost šumového pozadí se pohybuje v rozmezí 0-13. Ani při zvýšené citlivosti zde nejsou pozorovatelné žádné změny.



**Obrázek č. 30:** Jemnější zobrazení odečteného snímku

Stejně jako měření v bodech, i tato metoda potvrdila, že naměřená data nevykazují charakter polarizovaného záření. Na snímcích sice docházelo k jistým změnám intenzity záření, podrobnější pohled ale odhaluje, že jednotlivé změny jsou způsobeny šumovým pozadím. Toto zjištění také vysvětluje nepravidelné oscilování v předchozí metodě. Můžeme tedy prohlásit, že luminiscenční záření defektu mikropraskliny a blízkého okolí není lineárně polarizované.

# Závěr

Pomocí elektroluminiscence lze zjistit různé druhy defektů (skrytý lom, vnitřní prnutí, mechanické poškrábání, dislokace a jiné). Znalost charakteristických polarizačních průběhů luminiscenčního záření defektů by mohla pomoci při určování jednotlivých typů defektů v ploše článku a následné selekci kvalitních či méně kvalitních článků.

V práci je rozvedena problematika elektroluminiscence a luminiscenčního záření. Kapitoly popisují převážně luminiscenční záření defektů, konkrétně záření defektu mikropraskliny. V průběhu měření byly často řešeny problémy spojené s rozladováním optické soustavy a posunu obrazu. K odstranění problémů byla zhotovena nosná konstrukce polarizačního analyzátoru, která rozšířila stávající pracoviště elektroluminiscence. Naměřené hodnoty byly podrobeny pokročilejší analýze v programu MATLAB, konkrétně bodovou a plošnou metodou.

Výsledky polarizační analýzy prokázaly, že luminiscenční záření defektu mikropraskliny nevykazuje sinusoidní závislost intenzity záření na orientaci polarizačního filtru. Musíme však dodat, že použitá CCD kamera je schopná zaznamenat jen část spektra luminiscenčního záření křemíku. Nemůžeme tedy vyvrátit polarizační jevy při vyšších vlnových délkách, než jaké je použitá kamera schopná zaznamenat (viz dislokace, které jsou zaznamatelné až od vlnových délek 1350nm). Z výsledků lze ale prohlásit, že luminiscenční záření defektu mikropraskliny nebylo na vybraném polykrystalickém článku polarizované.

Je podstatné zabývat se dále analýzou defektů, neboť defekty značně ovlivňují účinnost fotovoltaického článku. Výše popsanými metodami lze proměřit i další druhy článků (AsGa, CdS) a defektů, které jsou popsány v teoretické části. Znalost jejich charakteru může vést k redukci jejich výskytu nebo přímo k jejich eliminaci v ploše a zlepšení tak kvality budoucích článků.

# Literatura

- [1] BENDA, V. Fotovoltaické články – historie a současné trendy vývoje [online]. 2010 [cit. 2013-4-28].  
Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>>.
- [2] BENDA, V. Solární články z krystalického křemíku – základní technologie současné fotovoltaiky [online]. 2006 [cit. 2013-4-28].  
Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>>.
- [3] BERTONI M.; COLIN C.; BUONASSISI T.; Dislocation Engineering in Multicrystalline Silicon, Solid State Phenomena Vols. 156-158 (2010) pp 11-18; Online available since 2009/Oct/28 at [www.scientific.net](http://www.scientific.net) [cit. 2013-5-22].
- [4] CCD kamery G2-0402, G2-1600 a G2-3200 [online]. 2012 [cit. 2012-11-26].  
Dostupný z WWW: <<http://ccd.mii.cz/art?id=321&lang=405>>.
- [5] DAILEY, J. Turn Your Cell Phone Screen into a Solar Panel with Wysips' Transparent Film [online]. 2011 [cit. 2013-5-20].  
Dostupný z WWW: <<http://inhabitat.com/turn-your-cell-phone-screen-into-a-solar-panel-with-wysips-transparent-film/>>.
- [6] DVOŘÁK, Lubomír a Zdeněk KUPKA. Fyzikální podstata a využití luminiscence / Lubomír Dvořák. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1980. 214 s.
- [7] Encyklopedie fyziky [online]. 2013 [cit. 2013-5-25]. Dostupný z WWW:  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/722-fotoelektricky-jev>
- [8] Fotovoltaické elektrárny [online]. 2012 [cit. 2013-4-14].  
Dostupný z WWW: <<http://www.tribaseelectric.cz/fotovoltaicke-elektrarny>>.
- [9] Fotovoltaika pro každého [online]. 2003 - 2009 [cit. 2013-4-10].  
Dostupný z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [10] FUYUKI T, KONDO H, YAMAZAKI T, TAKAHASHI Y, URAOKA Y. Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence Applied Physics Letters [online]. 2005 [cit. 2012-10-24].  
Dostupný z WWW: <<http://pveducation.org/pvcdrom/characterisation/electroluminescence>>.
- [11] Introduction to SIMS [online]. 2008 [cit. 2012-11-17].  
Dostupný z WWW: <<http://ccd.mii.cz/art?id=300&cat=23&lang=409>>.

- [12] JANDOVÁ, K. Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků. Brno, 2008. 91 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [13] 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.
- [14] KONEČNÝ M. Co je to luminiscence? [online]. 2012 [cit. 2012-11-25].  
Dostupný z WWW: <<http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/13-14-Konecny.html>>.
- [15] KUČERA, J. Monokrystalické či polykrystalické panely [online]. 2010 [cit. 2012-12-10].  
Dostupný z WWW: <<http://stavitel.ihned.cz/c1-43433570-monokrystalicke-ci-polykrystalicke-panely>>.
- [16] KUSALA, J. Výroba fotovoltaických článků a panelů [online]. 2006 [cit. 2013-4-28].  
Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k41.htm>>.
- [17] LIBICH, J. Základní kámen každého foťáku. Jak vzniká obraz v objektivu [online]. 2007 [cit. 2012-10-26].  
Dostupný z WWW: <[http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec\\_foto.aspx?c=A071025\\_103506\\_tec\\_foto\\_jlb](http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec_foto.aspx?c=A071025_103506_tec_foto_jlb)>.
- [18] MÖLLER H. J.; LONG L.; WERNER M.; YANG D.; Oxygen and Carbon precipitation in Multicrystalline Solar Silicon, phys. stat. sol. (a) 171, 175 (1999)
- [19] PELANT, Ivan a Jan VALENTA. Luminiscenční spektroskopie. II, Nanostruktury, elektroluminiscence, stimulovaná emise. Vyd. 1. Praha: Academia, 2010. 345 s.: . ISBN 978-80-200-1846-5.
- [20] PELESO, M; HOEX B.; ABERLE A.; Polarization analysis of luminescence for the characterization of silicon wafer solar cells. Appl. Phys. Lett. 98, 171914 (2011); doi:10.1063/1.3584857 (3 pages).
- [21] SLÁDEK, F. Diagnostika fotovoltaických článků pomocí LBIV. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaňek, Ph.D.
- [22] STOJAN, R.; VANĚK, J.; ŠIMONOVÁ, L.; VESELÝ, A.; FRANTÍK, O.  
Luminiscenční spektroskopie fotovoltaických článků. In 33. Nekonvenční zdroje elektrické energie. Hrotovice: Tribun EU s.r.o., 2012. s. 32-35. ISBN: 978-80-02-02372- 2.
- [23] Université LAVAL, Computer Vision and Systems Laboratory, [online]. [cit. 2013-5-24]  
Dostupný z WWW: <[http://vision.gel.ulaval.ca/~klein/ir\\_view/ir\\_view\\_doc.htm](http://vision.gel.ulaval.ca/~klein/ir_view/ir_view_doc.htm)>.

[24] VANĚČEK, M. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou [online]. 2000[cit. 2012-11-26]. Dostupný z WWW: <<https://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>>.

[25] Výukový portál gymnázia L. Jaroše, Holešov [online]. [cit. 2013-4-20]. Dostupný z WWW: <[http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/10\\_polar/10\\_polar.htm](http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/10_polar/10_polar.htm)>.

# Seznam obrázků, tabulek a symbolů

## Obrázky

Obrázek č. 1: Spektrum slunečního záření [24] .....	8
Obrázek č. 2: Struktura fotovoltaického článku [1] .....	10
Obrázek č. 3: Monokrystalický (vlevo) a polykrystalický článek [9].....	11
Obrázek č. 4: Nehomogenní difúzní vrstva [9] .....	12
Obrázek č. 5: Detail vnitřního pnutí [9] .....	13
Obrázek č. 6: Vírový defekt (swirl) .....	13
Obrázek č. 7: Mechanické poškrábání [21].....	14
Obrázek č. 8: Nedokonalé kontaktování (finger) .....	14
Obrázek č. 9: Mikroprasklina .....	14
Obrázek č. 10: Dislokace .....	15
Obrázek č. 11: Detail kyslíkového precipitátu [18] .....	15
Obrázek č. 12: Mechanismy luminiscence .....	16
Obrázek č. 13: Vyzařovací spektrum Si [10] .....	18
Obrázek č. 14: Druhy polarizace elektromagnetického záření [25].....	19
Obrázek č. 15: Pohled na polarizované oblasti (vlevo), graf závislosti intenzity na pootočení filtru (vpravo) [20] .....	20
Obrázek č. 16: Schéma zapojení pracoviště .....	22
Obrázek č. 17: CCD čip KAF-3200ME [4] .....	23
Obrázek č. 18: Spektrální citlivost CCD [4] .....	23
Obrázek č. 19: CCD kamera [4].....	23
Obrázek č. 20: Obsluha kamery v programu SIMS .....	24
Obrázek č. 21: Histogram.....	24
Obrázek č. 22: Vybraný vzorek pro detailnější analýzu; Detail vybrané oblasti .....	25
Obrázek č. 23: Nosná konstrukce (vlevo); polarizační filtr (vpravo).....	26
Obrázek č. 24: Ovládací panel skriptu IR_view .....	27
Obrázek č. 25: Elektroluminiscenční snímek zobrazen v MATLAB .....	28
Obrázek č. 26: Vybraná oblast s vyznačenými body měření .....	28
Obrázek č. 27: Graf závislosti intenzity záření na pootočení polarizačního filtru .....	29
Obrázek č. 28: Výsledek odčítání snímků pro 10° a 110° .....	30
Obrázek č. 29: 3D analýza .....	30
Obrázek č. 30: Jemnější zobrazení odečteného snímku .....	31

## Tabulky

Tabulka č. 1: Naměřené hodnoty v bodech A, B, C.....	29
--	----



# Symboly a zkratky

CCD		- Charge-coupled device
E	[J]	- obecně energie
E <sub>2</sub> ,E <sub>1</sub>	[eV]	- energetické hladiny
E <sub>i</sub>	[J]	- ionizační energie
eV		- elektronvolt, jednotka energie (1 eV = 1,602·10 <sup>-19</sup> J)
f	[Hz]	- kmitočet dopadajícího záření
h	[J.s]	- Plancova konstanta
I	[A]	-elektrický proud
I <sub>a</sub>	[-]	- intenzita luminiscenčního záření
IR		-Infra Red
I <sub>smyčka</sub>	[A]	- proud protékající proudovou smyčkou
LBIC		- Light Beam Inducted Current
LBIV		- Light Beam Inducted Voltage
Ø		-průměr
P	[W]	-výkon
RGB		-Red Blue Green
SIMS		- Simple Image Manipulation Systém
t	[°C]	- teplota
U	[V]	-elektrické napětí
U <sub>p</sub>	[V]	- prahové napětí
UV		- Ultra Violet
W <sub>v</sub>	[J]	- výstupní práce
λ	[m]	- vlnová délka záření