



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**LUMINISCENČNÍ DIAGNOSTIKA FOTOVOLTAICKÝCH
ČLÁNKŮ**

LUMINESCENCE DIAGNOSTIC OF PHOTOVOLTAIC CELLS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Radek Stojan

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2018

Abstrakt:

Diagnostika vad fotovoltaických článků patří ke stěžejním krokům jejich výroby. Předkládaná dizertační práce pojednává o diagnostice fotovoltaických článků pomocí zářivé rekombinace párů elektron – díra, jenž nazýváme luminiscence. Diagnostické metody využívající této lokální emise světla v infračervené oblasti mají velký inovativní potenciál. Metoda elektroluminiscence patří mezi nejpoužívanější luminiscenční metody, jejíž modifikace se používají napříč elektrotechnickým průmyslem, zvláště pak polovodičovým.

Stěžejní oblast výzkumu této práce je zaměřena na nedestruktivní analýzu vyzařovaného infračerveného záření monokrystalických a polykrystalických solárních článků při různých modifikacích standardní metody elektroluminiscence. Jako detektory odezvy luminiscenčního záření jsou v rámci práce aplikovány dva typy CCD kamer. Při použití mikroskopické metody elektroluminiscence je analyzován faktor zvětšení zobrazení lokální emise v mikroploše článku a diskutován jeho přínos v kvalitativním hodnocení defektivity článku.

Luminiscenční záření emitované solárními články má vlnovou povahu, což přináší potenciální možnost využití některých charakteristických vlastností vlnění jako intenzity a nově polarizace v průběhu detekce defektů v ploše solárních článků. Inovace měřicího pracoviště standardní metody elektroluminiscence k využití polarizační analýzy je jedním z cílů této práce.

Klíčová slova:

Solární článek, křemík, luminiscence, mikroskopie, polarizace, defekt.

Abstract:

Diagnostic of photovoltaic cells defects is one of the key step in production. This dissertation thesis deals about diagnosis of photovoltaic cells by radiative recombination of electron - hole pairs. This radiative recombination is known as luminescence. Diagnostic methods using this local light emission in infrared region have innovative potential. The method of electroluminescence is one of the most widely used luminescence methods whose modifications are applied across the industry, especially in semiconductors.

The main area of this thesis research is focused on non-destructive analysis of radiated infrared radiation of monocrystalline and polycrystalline solar cells in various modifications of standard electroluminescence method. In this research there are used two types of CCD cameras are used as luminescent radiation detectors. Method of photon emission microscopy is used for magnification element. Local light emission inspection by microscopy should have benefit to qualitative evaluation of solar cells defects.

Radiation emitted by the solar cell has a wave character. This fact brings the potential of using some of the characteristics of the waves. We are talking about the intensity and mainly about new characterization by polarization during the detection of defects in the solar cell surface. Innovation of the measuring workplace of the standard electroluminescence method to use polarization analysis is one of the goals of this dissertation thesis.

Keywords:

Solar cell, silicon, luminescence, microscopy, polarization, defect.

Bibliografická citace díla:

STOJAN, R. *Luminiscenční diagnostika fotovoltických článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 101 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího dizertační práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační 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:

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu dizertační práce Doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání dizertační práce. Poděkování patří také společnostem Solartec s.r.o. a ON Semiconductor Czech Republic, s.r.o. za spolupráci a poskytnutí zázemí pro analýzu solárních článků. Dále bych chtěl poděkovat své ženě Lucii, dětem Štěpánkovi a Barunce a v neposlední řadě svým rodičům za podporu a motivaci během zpracovávání dizertační práce.

OBSAH

ÚVOD	9
1 MOTIVACE	11
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	12
3 VÝVOJ FOTOVOLTAIKY	13
4 SOLÁRNÍ ČLÁNEK	15
4.1 PRINCIP A STRUKTURA SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	17
4.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI P-N PŘECHODU	19
4.2.1 <i>Generačně-rekombinační procesy</i>	21
4.3 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	23
4.4 TYPY ČLÁNKŮ DLE POUŽITÉHO MATERIÁLU	26
4.5 DEFEKTY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	27
4.5.1 <i>Materiálové defekty</i>	28
4.5.2 <i>Výrobní (procesní) defekty</i>	29
4.5.1 <i>Micro-cracks (mikropraskliny)</i>	31
4.6 SOUHRN DIAGNOSTICKÝCH METOD DETEKCE DEFECTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	32
5 LUMINISCENCE	37
5.1 DEFINICE LUMINISCENCE	37
5.2 ZÁŘIVÁ REKOMBINACE PÁRU ELEKTRON - DÍRA	38
5.3 SPEKTRUM LUMINISCENČNÍHO ZÁŘENÍ KŘEMÍKOVÉHO SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	39
5.4 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI LUMINISCENCE	39
5.4.1 <i>Polarizace luminiscenčního záření</i>	40
5.5 LUMINISCENČNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY PRO ANALÝZU SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	42
5.5.1 <i>Elektroluminiscence</i>	42
5.5.2 <i>Fotoluminiscence</i>	43
5.5.3 <i>Mikroplazma</i>	43
5.5.4 <i>Měřicí pracoviště metody elektroluminiscence a mikroplazmy</i>	44
5.5.5 <i>Měřicí pracoviště luminiscenční mikroskopie</i>	45
5.5.1 <i>Programové zpracování výstupních snímků luminiscenčních metod</i>	46
5.6 DETEKTOR LUMINISCENČNÍHO ZÁŘENÍ	47
6 PRAKTICKÁ ČÁST	50
6.1 VSTUPNÍ MATERIÁL – ANALYZOVANÉ VZORKY	50
6.2 MONOKRYSTALICKÉ SOLÁRNÍ ČLÁNKY	50
6.2.1 <i>Elektrické vlastnosti mono-Si článků</i>	53
6.2.2 <i>Měření mono-Si článků standardní metodou elektroluniniscence</i>	54
6.3 POLYKRYSTALICKÉ SOLÁRNÍ ČLÁNKY	56
6.3.1 <i>Elektrické vlastnosti poly-Si článků</i>	57
6.3.2 <i>Měření poly-Si článků standardní metodou elektroluniniscence</i>	57
6.4 MODIFIKOVANÉ METODY ELEKTROLUMINISCENCE	61
6.5 PHOTON EMISSION MICROSCOPY - PEM	61
6.5.1 <i>Pracoviště metody PEM</i>	62
6.5.2 <i>NIR objektivy pro metodu PEM</i>	63
6.5.3 <i>PEM analýza monokrystalických solárních článků</i>	64

6.5.4	<i>PEM analýza polykrystalických solárních článků</i>	67
6.6	POLARIZAČNÍ ANALÝZA METODY ELEKTROLUMINISCENCE	69
6.6.1	<i>CCD detektor - bandgap luminiscence</i>	69
6.6.1	<i>Úprava měřicího pracoviště metody elektroluminiscence</i>	70
6.6.2	<i>Nastavení CCD kamery G2-3200</i>	71
6.6.3	<i>Vstupní charakterizace solárního článku</i>	71
6.6.4	<i>Defekty polarizační analýzy</i>	73
6.6.1	<i>Intenzita polarizovaného luminiscenčního záření</i>	74
6.6.2	<i>Polarizační analýza vybraného vzorku</i>	75
6.6.3	<i>Stupeň polarizace luminiscenčního záření</i>	80
6.6.1	<i>Celkové výsledky měření míry polarizace</i>	81
7	ZÁVĚR	82
8	DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM	84
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
10	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ, TABULEK, SYMBOLŮ A ZKRATEK	90
10.1	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	90
10.2	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	93
10.3	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, ZKRATEK A ODBORNÝCH VÝRAZŮ	93
11	PUBLIKACE AUTORA	97
12	ŽIVOTOPIS AUTORA	100

Úvod

S neustálým vývojem civilizace se vyvíjí i její energetické nároky a zároveň snaha tyto nároky pokrýt ekologicky čistými zdroji elektrické energie, jako je např. slunce. energii slunečního záření je možno využít mnoha způsoby. Jedním z nich je jeho přeměna na elektrickou energii.

Vědní obor zabývající se přeměnou světla na elektrickou energii se nazývá fotovoltaika. Tento termín pochází z řečtiny a jeho základ tvoří dvě slova "foto = světlo" a "volt – jednotka elektrického napětí". Základní stavební jednotkou fotovoltaiky je solární článek, tedy velkoplošný polovodičový prvek.

Fotovoltaika stále patří k nejperspektivnějším alternativním zdrojům energie v celosvětovém měřítku. Dynamicky rostoucí celkový instalovaný výkon solárních panelů je toho důkazem. Bohužel je v dnešní době pojem fotovoltaika v české republice u velké části populace zakotven spíše pod synonymem „solárního byznysu“. Zde se dostáváme na tenký led ekonomické stránky věci, jež válcuje vědecký vývoj. Je všeobecně známo, že na vině byl špatně nastavený systém „solárního boomu“ v ČR, jenž souvisí s otázkou centralizace a decentralizace solárních systémů. Právě fotovoltaika a s ní spjatá diagnostika solárních článků mne však provázela po celou dobu studia na Vysokém učení technickém v Brně. A i přes nelehkou dnešní dobu věřím, že má tento obor do budoucna stále velký potenciál s využitím zejména na decentrální úrovni. Tzn. například právě fotovoltaické systémy na střechách rodinných domů, jsou tím správným směrem, s nímž také sympatizuji a při rekonstrukci svého rodinného domu počítám.

Tento alternativní způsob výroby elektřiny klade důraz na nízkou cenu a vysokou účinnost jeho základních prvků - solárních článků. K tomu, abychom mohli vyrábět kvalitnější solární články, musíme být schopni správně analyzovat a odhalit defekty v solárních článcích. Proto se analýze a hledání defektů solárních článků věnuje celosvětově velká pozornost.

Existuje mnoho diagnostických metod solárních článků, rozlišujících různorodé defekty krystalické mřížky jako jsou např. dislokace, hranice zrnitosti, mikropraskliny, mechanická poškození, lokální zkraty aj. Zejména prvně uvedené typy defektů jsou typické pro levnější polovodičový materiál, jímž bývá polykrystalický křemík. Charakterizaci defektů na základě různé intenzity emitovaného záření využívají luminiscenční metody. Je důležité si uvědomit, že pokud mluvíme o luminiscenčním záření, stále hovoříme o elektromagnetickém vlnění. Luminiscenční záření je tedy charakterizováno stejně jako elektromagnetické vlnění, a to intenzitou, spektrem, koherencí, dobou trvání a polarizací. Tato práce poskytuje náhled na nové potenciální možnosti využití charakteristické vlastnosti luminiscenčního záření při detekci defektů solárních článků.

Solární článek absorbuje záření v celém viditelném i blízkém infračerveném (s energií vyšší než 1,125 eV) spektru. Samotný křemíkový článek však vykazuje jen slabou luminiscenci s maximem v infračervené oblasti. Emisní intenzita fotonů je závislá na množství defektů v článku, s vyšším počtem klesá.

Podle způsobu buzení luminiscenčního záření z křemíkových solárních článků budeme nejčastěji mluvit o elektroluminiscenční, fotoluminiscenční nebo metodě pozorování mikroplazmy. Hlavní myšlenka této práce je uvedena již v názvu. Mluvíme o luminiscenční diagnostice, jakožto o souboru detekčních metod pro určení stupně poškození neboli defektivitu solárních článků na základě analýzy vlastností a vzniku luminiscenčního záření.

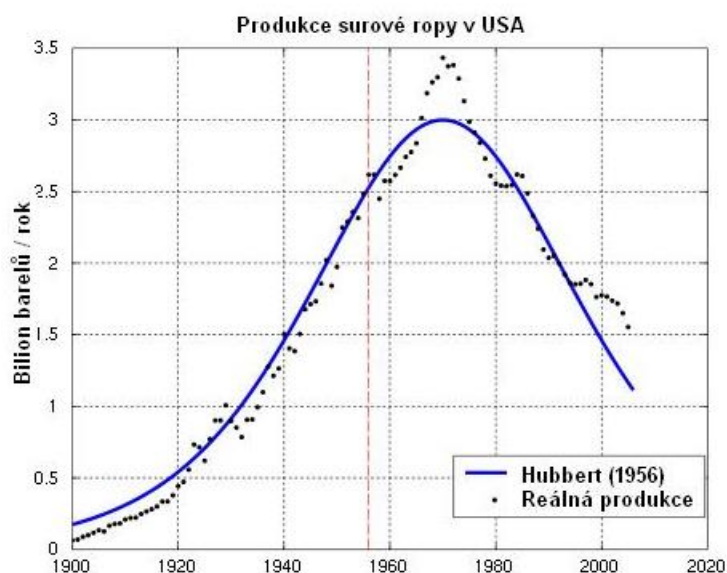
Hlavní část této práce je zaměřena na nedestruktivní analýzu vyzařovaného infračerveného záření solárních článků při různých modifikacích standardní metody elektroluminiscence. Zvláště pak hovoří o interpretaci dat získaných mikroskopickou metodou elektroluminiscence a potenciálním vlivu optického zvětšení lokální emise v mikroploše článku na detekovatelnost poruch. Potenciál využití charakteristické vlastnosti luminiscenčního záření spočívá ve využití polarizační schopnosti záření a v inovaci základní metody elektroluminiscence právě rozšířením o tuto polarizační analýzu při detekci defektů solárních článků. Matematická interpretace polarizace luminiscenčního toku vzniklého během rekombinace mezi energetickými hladinami solárního článku a popis změny intenzity této emise v závislosti na typu konkrétního defektu otevírá potenciální další možnosti a samozřejmě další nové otázky v této oblasti diagnostiky vad křemíkových solárních článků pomocí luminiscenčních metod. Jednou z výhod těchto metod je nedestruktivita a opakovatelnost měření, hovoříme proto o nedestruktivní diagnostice solárních článků. Vlastní inovativní přínos této práce spočívá v modifikaci pracoviště metody EL a předložení metodiky postupu u jednotlivých charakterizací defektů.

Solární články zkoumané v rámci této práce byly vyrobeny a dodány firmou Solartec s. r. o. Při analýze konkrétních solárních článků jsem také využil mé dlouhodobé spolupráce s firmou ON Semiconductor Czech Republic, s.r.o. sídlící v Rožnově pod Radhoštěm. Firma ON Semiconductor patří do skupiny deseti nejúspěšnějších světových výrobců polovodičových součástek a disponuje kvalitním zázemím pro analýzu polovodičových součástek. Díky tomu mohla být pro detailní analýzu fotovoltaických článků použita metoda mikroskopické analýzy fotonové emise (Photon Emission Microscopy - PEM) a také analýza struktury a topografie článku za pomoci elektronového mikroskopu TESCAN - FERA3.

1 Motivace

Na první pohled by se mohlo zdát, že možná hrozba budoucího vyčerpání fosilních paliv a tím stále vyšší fokus lidstva na obnovitelné zdroje energie je jakýmsi motivačním evergreenem všech, tj. nejen akademických prací v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Z racionálního pohledu by se však tato možná hrozba měla doopravdy stát jedním z motivačních faktorů pro získávání nových inovačních poznatků a informací v této vědní oblasti.

Hubbertova teorie ropného vrcholu je známá již více než půl století. Popisuje ropný vrchol jako okamžik, kdy těžba ropy dosáhne maxima (a to v rámci jednotlivého ložiska, oblasti, státu nebo celého světa) a od kterého produkce ropy vstupuje fázi poklesu až k úplnému vyčerpání. Teorie byla pojmenována po americkém geologovi M. K. Hubbertovi, který v roce 1956 předpověděl, že těžba ropy v USA dosáhne vrcholu okolo roku 1970. O rok později dosáhla skutečně těžba ropy v USA svého vrcholu a od té doby neustále klesá (viz. obr. 1) [1].



Obr. 1: Hubbertova teorie ropného vrcholu v USA [2]

Luminiscence fotovoltaiických článků je velmi zajímavou výzkumnou oblastí. Studium vzniku, měření a interpretací energetického spektra luminiscence křemíku je hlavním cílem a příležitostí práce *Luminiscenční diagnostiky fotovoltaiických článků* pro získání nových inovativních poznatků. Albert Einstein kdysi pronesl slavný výrok:

„Uprostřed každého problému se nachází příležitost“.

Myslím si, že právě slova slavného německého fyzika, jednoho z nejvýznamnějších vědců všech dob, nositele Nobelovy ceny za fyziku za „*vysvětlení fotoefektu a zásluhy o teoretickou fyziku*“, vystihují podstatu motivace k sepsání této, ale i mnohých jiných prací.

2 Cíle disertační práce

Dnešní doba klade důraz na nízkou cenu a vysokou účinnost solárních článků. K tomu, abychom mohli vyrábět kvalitnější solární články, musíme být schopni korektně odhalit a identifikovat defekty v solárních článcích. S dynamicky vzrůstajícím objemem výroby se diagnostické metody stávají klíčovou a nepostradatelnou součástí produkčních postupů výrobců solárních článků. Mezi trendy a kritéria pro výběr diagnostických metod dnešních výrobců patří zejména účelnost a kvalitativní přínos výsledků, rychlost identifikace defektů, jednoduchost, možnost automatizace většiny kroků, destruktivita metody a opakovatelnost.

Diagnostické metody využívající lokální emisi světla mají v tomto ohledu velký potenciál. Lokální emise luminiscenčního záření je stále do jisté míry neprozkoumanou oblastí. Nejsou objasněny některé projevy, jako například polarizace luminiscenčního záření jednotlivých defektů v ploše solárního článku. Metoda elektroluminiscence patří mezi nepoužívanější luminiscenční metody detekce defektů. Její modifikace se používají napříč polovodičovým průmyslem.

Na základě výše uvedených poznatků si dizertační práce klade za hlavní cíl analýzu defektů solárních článků:

- mikroskopickou metodou elektroluminiscence, kdy faktor zvětšení zobrazení lokální emise v mikroploše článku může přinášet zpřesňující informaci v kvalitativním hodnocení defektivy,
- inovovanou metodou elektroluminiscence, využívající efekt polarizace luminiscenčního záření.

Výstupy výše uvedených analýz budou podloženy elektrickými daty jednotlivých solárních článků a korelovány se standardními metodami elektroluminiscence a mikroplazmy. Pro dosažení hlavních výše uvedených cílů dizertační práce v rámci studia diagnostiky solárních článků bylo nezbytné splnit dílčí kroky. Tzn. rozšířit znalosti o defektech struktury solárních článků a jejich charakteristických vlastností při různě polarizovaném PN přechodu. Vytvoření metodiky měření polarizační závislosti luminiscenčního záření v oblastech vybraných lokálních defektů. Danou metodikou pak prozkoumat intenzitu a polarizaci, jakožto charakteristické vlastnosti luminiscenčního záření, u vybraného typu defektu solárních článků. Matematicky pak interpretovat polarizaci luminiscenčního toku vzniklého během rekombinace mezi energetickými hladinami. V souboru dosažených výsledků bylo nutné se zabývat kvalitativní analýzou dopadu defektů na účinnost článků získanou na základě elektrických dat.

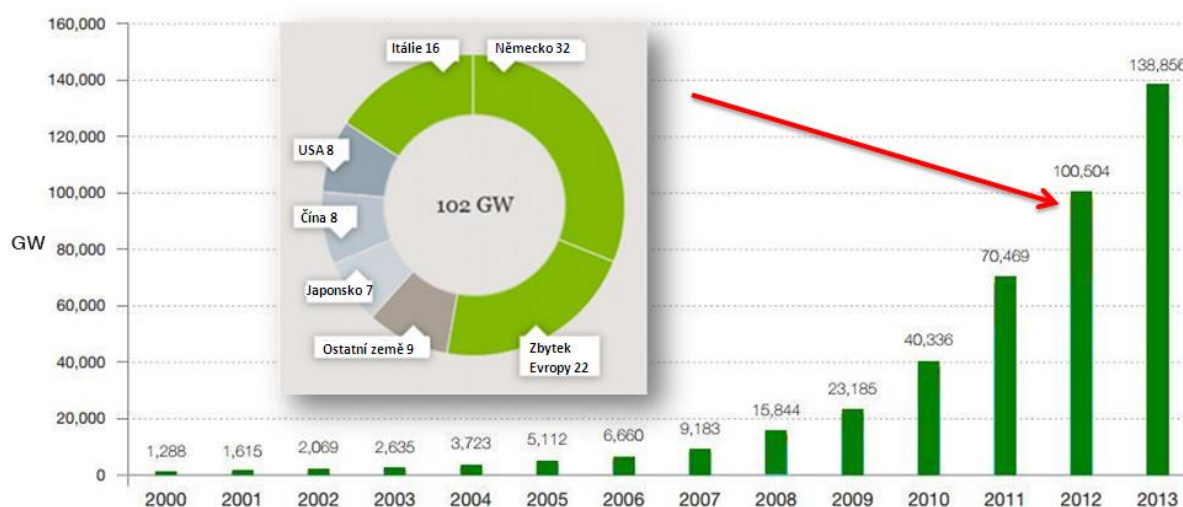
Stěžejní oblastí výzkumu této dizertační práce je analýza nedestruktivní charakterizace solárních článků detekční metodou luminiscence a vlastní inovativní přínos v podobě užití mikroskopické a polarizační luminiscenční metodiky pro charakterizaci defektů solárních článků.

3 Vývoj fotovoltaiky

Jak jsem již v úvodu naznačil, oblast fotovoltaiky je velmi široké a rozmanité téma, jež je mi již řadu let blízké. Historie fotovoltaiky ovšem sahá až do 19. století. Fotovoltaika, jakožto obor zabývající se přímou přeměnou slunečního záření na elektřinu, byla objevena již v r. 1839, fyzikem francouzského původu Alexandrem Edmondem Becquerelem. O pár desítek let později, v roce 1883 byl zkonstruován první selenový solární článek, jehož účinnost se pohybovala okolo jednoho procenta. Prakticky první použitelný fotovoltaický článek s účinností kolem 6 % byl vyroben v roce 1954 Bellovými laboratořemi [3].

Vývoj solárních článků se ubírá od té doby dle tří zřejmých priorit: zlepšení kvality solárních článků, zvýšení jejich účinnosti a snížení výrobních nákladů.

Každé zvyšování má své limity. Např. maximální teoretická účinnost křemíkového solárního článku pro běžné spektrum a intenzitu slunečního záření je kolem 33 % (tzv. Shockleyův-Queisserův limit). Přibližně před deseti lety platilo, že u experimentálních křemíkových článků dosahuje účinnost kolem 24,7 %, přičemž nejlepší komerční články se pohybovaly s účinností kolem 22 % [4]. Dnes je tato hodnota ještě přibližně o dvě procenta vyšší a tedy nejkvalitnější monokrystalické komerční solární články již dosahují účinnosti atakující hranici 24 % [5].



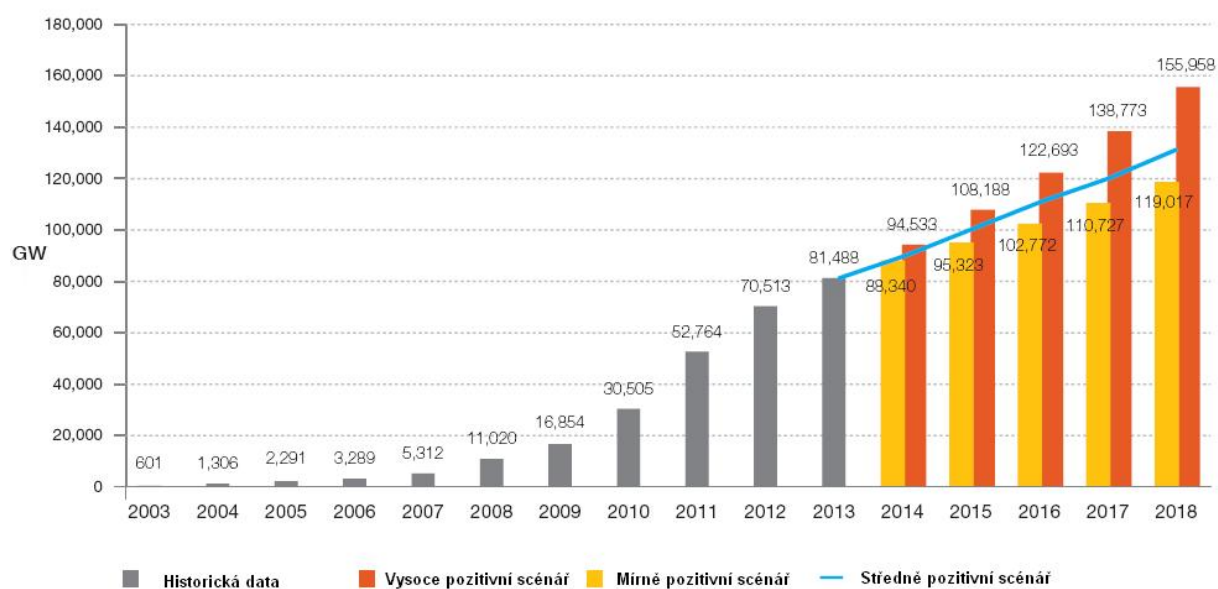
Obr. 2: Vývoj globální instalované fotovoltaické kapacity od roku 2000 do roku 2013 [6]

V roce 2014 vydala uznávaná Evropská fotovoltaická průmyslová asociace (EPIA) dokument (Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018), v němž hodnotí a predikuje vývoj fotovoltaického trhu. S odstupem času je zajímavé jak tato data korelují aktuální dnešní vývoj trhu. Pokud se podíváme zpět do roku 2013, můžeme směle konstatovat neustálý globální

rozmach kapacity přeměny sluneční energie na elektřinu. Konkrétní světová čísla do roku 2013 můžeme vidět na obr. 2, přičemž například v roce 2012 připadlo přibližně 70 GW na celou Evropu [6].

Na základě těchto dat si nyní představme, jak vypadala predikce v roce 2013 této evropské části (kapacity pro přeměnu sluneční energie) pro budoucí roky, tedy současnost (viz. obr. 3). V roce 2017 byl aktualizovaný dokument *Global Market Outlook for Photovoltaics 2017-2021*, v němž je potvrzen mírně pozitivní scénář vývoje instalovaného výkonu viz. obr. 3. a hodnotu instalovaného výkonu pro Evropu predikuje v předpokladu mírně pozitivního scénáře okolo 150 GW do roku 2021 [7].

Je třeba mít stále na paměti, že s tímto rostoucím objemem pokrytí spotřeby elektrické energie právě solární energií, je vyvíjen tlak na tři již výše uvedené priority: kvalita, účinnost, cena solárních článků.



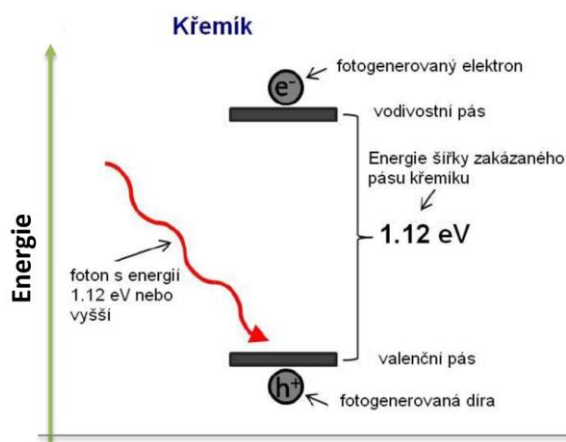
Obr. 3: Predikce vývoje instalované kapacity pro EVROPU až do roku 2018 [6]

Míra zajímavosti těchto informací vzroste, pokud si ještě uvědomíme, že na 1 kWp nainstalovaného výkonu potřebujeme plochu přibližně 8 metrů čtverečních [8].

4 Solární článek

Základní stavební jednotkou fotovoltaiky je tedy velkoplošný polovodičový prvek - solární článek. Solární článek pracuje na principu fotoelektrického jevu. Fenomén zvaný „fotoelektrický jev“ je tedy považován za základ fotovoltaické technologie. Fotovoltaický jev se dá stručně popsat jako produkce elektrického proudu v pevných polovodičích působením solární energie. Dopadající sluneční svit se skládá z fotonů, částic solární energie. Po dopadu fotonu na fotovoltaický článek, zobrazený na obr. 7, může dojít k jeho odražení, pohlcení, nebo může projít skrz článek. Z těchto tří variant pouze pohlcené fotony produkují elektřinu.

Dle výše uvedeného tvrzení je zřejmé, že k tomu, aby vůbec fotovoltaický jev u křemíkového článku vznikl, musí mít foton energii minimálně 1,12 eV. Hodnota 1,12 eV u křemíku vyjadřuje šířku zakázaného pásu polovodiče, v zahraniční literatuře označována jako „bandgap“ energie. Pokud má energii nižší, prochází křemíkem a není v něm absorbován. Velmi jednoduše popsáno, při mezní energii 1,12 eV (můžeme také nazvat absorpční hrana krystalického křemíku) je foton křemíkem absorbován a vzniká v krystalu křemíku jeden volný elektron a jedna kladná "díra" (viz. obr. 4). Foton s větší energií než 1,12 eV způsobí vznik elektronu a kladné "díry", přičemž rozdíl energie fotonu a energie šířky zakázaného pásu křemíku se přemění na teplo. Zahřátí polovodiče představuje ztráty, jež snižují účinnost přeměny energie [3], [9].

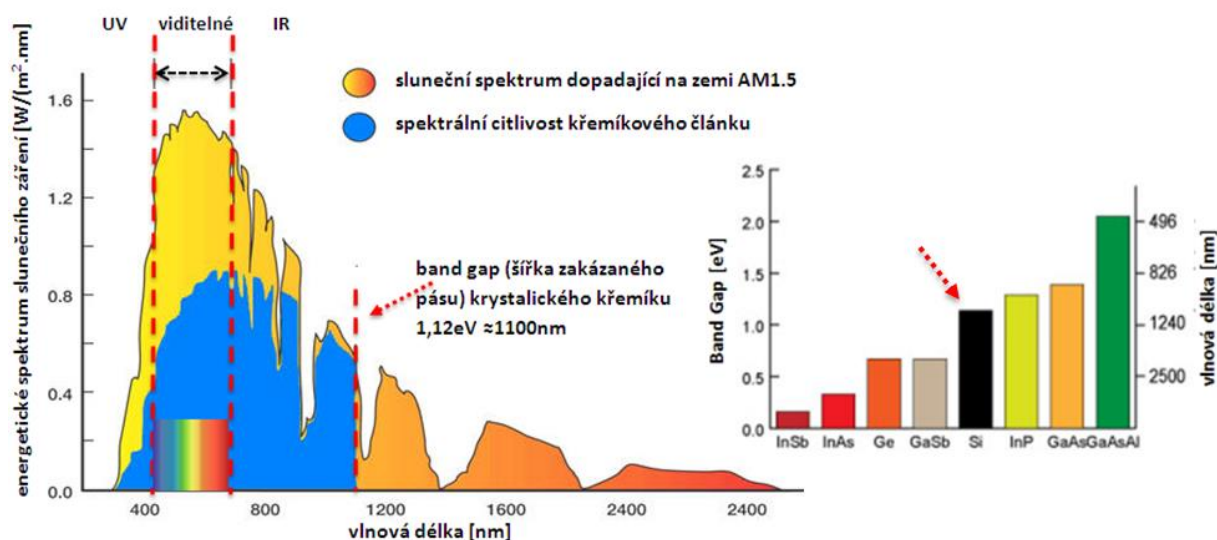


Obr. 4: Energetický diagram absorpce fotonu a vytvoření páru elektron-díra v křemíku [10]

Na obr. 5 můžeme vidět spektrální citlivost křemíkového solárního článku a spektrum slunečního záření AM1.5, což odpovídá průchodu slunečního spektra jeden a půl násobně mohutnější vrstvou vzduchu než AM0 při výšce Slunce přibližně 45° nad obzorem.

Již v úvodu byl zmíněn tzv. Shockleyův–Queisserův limit, tedy hranice pro maximální teoretickou účinnost přeměny slunečního záření na elektřinu pro solární článek s jedním P-N

přechodem. Tento limit závisí právě na šířce zakázaného pásu použitého polovodiče a spektru slunečního záření [11].

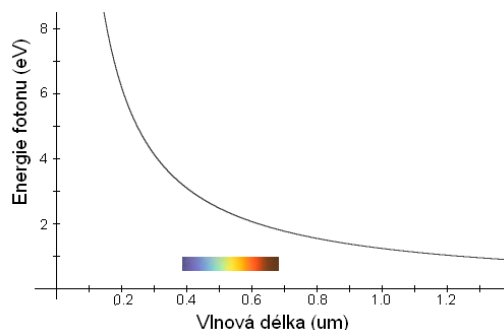


Obr. 5: Spektrum slunečního záření a spektrální citlivost křemíkového solárního článku s vyznačenou hodnotou bandgap energie pro křemík [11]

Čisté polovodiče a jejich sloučeniny mají každý specifickou šířku zakázaného pásu. Na obr. 5 je také patrné rozložení těchto energií pro daný typ polovodiče. Ekvivalent mezní vlnové délky pro band gap energii získáme dle vztahu (1) [12]:

$$\lambda = \frac{hc}{e b} \quad \left\{ \begin{array}{ll} c = 2,998 \cdot 10^8 & \text{Rychlost světla [m/s]} \\ h = 6,6262 \cdot 10^{-34} & \text{Planckova konstanta [J.s]} \\ e = 1,60219 \cdot 10^{-19} & \text{Energie fotonu [J]} \\ b & \text{Bandgap [eV]} \\ \lambda & \text{Vlnová délka [m]} \end{array} \right. \quad (1)$$

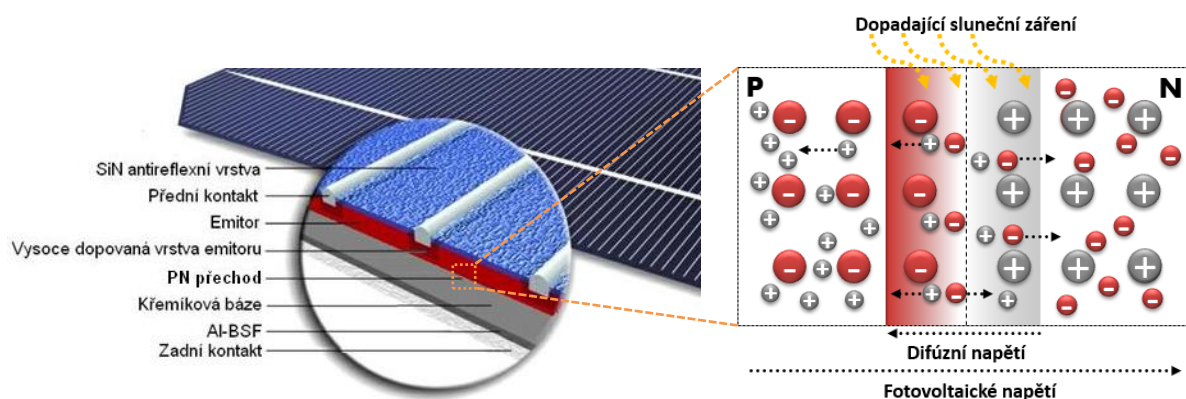
Závislost základního vztahu vlnové délky a energie fotonu (tedy vynecháním členu 1/b v rovnici (1)) je vynesena v obr. 6.



Obr. 6: Závislost vlnové délky a energie fotonu

4.1 Princip a struktura solárního článku

V níže uvedeném textu je uveden základní princip a běžně používaná struktura SC. Dopadajícím slunečním zářením jsou v solárním článku vybuzeny elektricky nabitě částice páry elektron – díra. Vnitřním elektrickým polem P-N přechodu jsou některé páry separovány. V důsledku tohoto rozdělení pak vzniká napěťový rozdíl mezi předním a zadním kontaktem fotovoltaického článku.



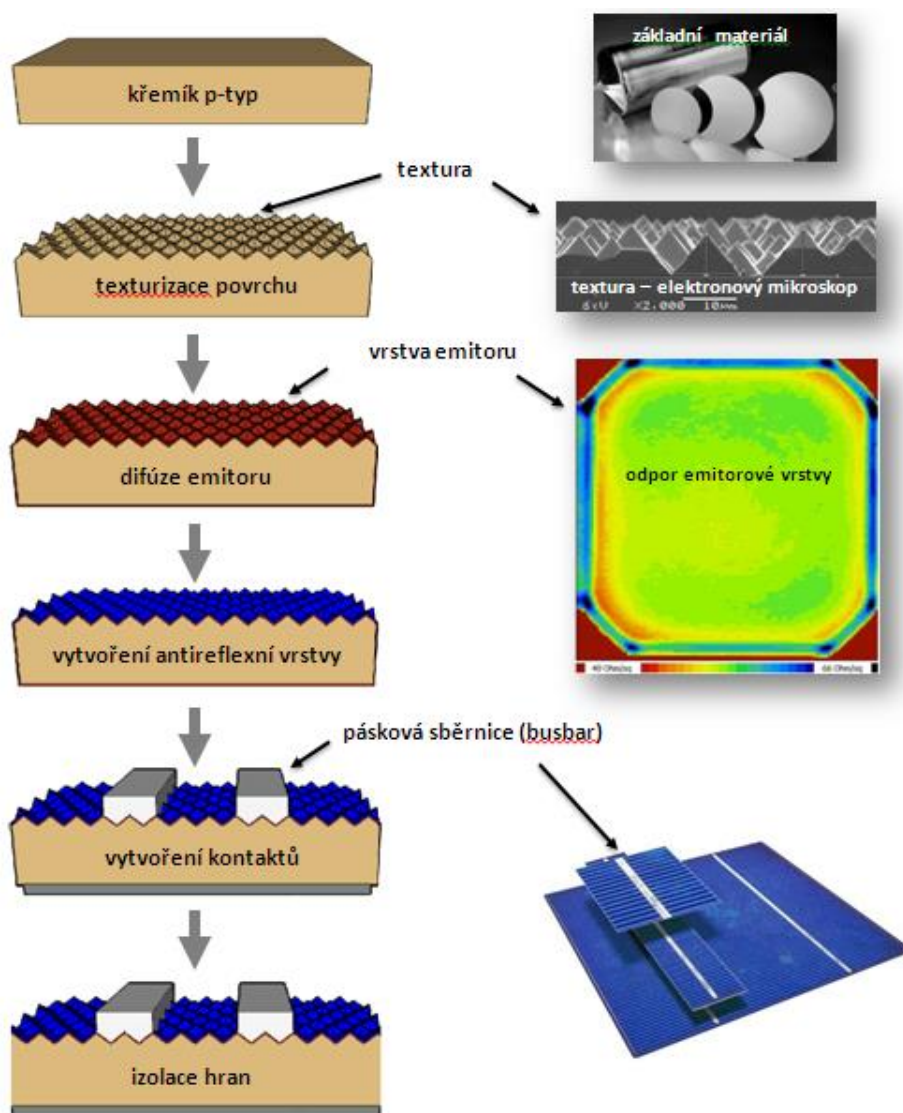
Obr. 7: Solární článek a jeho struktura [13]

Pokud připojíme mezi oba kontakty zátěž, pak jí protéká stejnosměrný elektrický proud. Plocha solárních článků a intenzita dopadajícího slunečního záření je přímo úměrná protékajícímu proudu. Reálný model struktury křemíkového solárního článku je uvedena na obr. 7 [14].

Velmi zjednodušeně znázorněný základní postup výroby monokrystalického solárního článku, jež je používán s různými variacemi daných kroků ve standardní výrobě, můžeme vidět na obr. 8. Většina dnes používaných článků z monokrystalického a polycrystalického křemíku používá základní substrát s typem vodivosti P (nejčastěji křemík dopovaný bórem), označován jako báze. Polycrystalické křemíkové ingoty vyráběné litím do forem se vyrábějí se čtvercovým průřezem. Monokrystalické ingoty (vyrobené např. tažením kelímku) se ořezávají na čtvercový průřez k efektivnějšímu využití plochy solárních panelů. Ingoty se rozřezou na tenké destičky s maximální tloušťkou 0.3 mm. Tento surový materiál se chemickou cestou několik milimetrů odleptá, čímž se odstraní vrstva pohmožděná řezáním, a následně se vytvoří textura - náhodné pyramidky (destička zmatná, snižuje reflexi dopadajícího záření a lépe tak pohlcuje světlo) [15], [16].

K vytvoření PN přechodu je třeba pomocí procesu difúze vytvořit v bázi vrstvičku křemíku typu N, tzv. emitor solárního článku. Tato vrstvička je vzhledem k tloušťce substrátu velmi plýtká. Emitterová difúze je nejčastěji prováděna ze zdroje fosforu - POCl_3 (chlorid fosforitý). Dalším krokem je vytvoření antireflexní nitridové vrstvy (tloušťky 80 až 100 nm nejběžněji), čímž článek získá svou modrou barvu. Vodivou pastou se metodou sítotisku vyrobí metalizace

na zadní i přední straně. Poté se článek vypálí, neboli sintruje. Tím se vytvoří vodivé propojení metalizace s křemíkem.



Obr. 8: Základní postup výroby monokrystalického solárního článku [16]

Metalizace zadní strany článku je obvykle provedena pomocí pasty s velkým obsahem hliníku (trojmocný prvek). Tím se vytvoří na rozhraní křemík-hliník lokální silně dopovaná oblast P+ o značována v jako BSF = Back Side Field. Jednoduše řečeno, toto elektrické pole na zadní straně článku přispívá ke snížení povrchové rekombinace minoritních nosičů v této oblasti. Kontakty jsou příčně vodivě propojeny pomocí sběrníkových pásků, tzv. „busbary“, z Ag-Al pasty, kde stříbro zaručuje dobrou pájitelnost. Posledním krokem je izolace hran solárního článku broušením nebo laserem (lokálním přerušením emitoru) [15], [16].

4.2 Fyzikální vlastnosti P-N přechodu

Polovodiče se dělí na vlastní (intrinšické) a příměsové podle typu nosiče náboje. Koncentrace vodivostních elektronů n a děr p v čistém polovodici je dána vztahem (2):

$$np = n_i^2 = BT^3 \exp\left(\frac{-W_g}{kT}\right), \quad (2)$$

kde n_i značí intrinšickou koncentraci volných nosičů náboje, B je konstanta závisící na pásové struktuře polovodiče (křemík $B = 1,36 \cdot 10^{45} \text{ m}^{-6}\text{T}^3$), W_g je šířka zakázaného pásu (tedy rozdíl mezi E_C a E_V), T je absolutní teplota v Kelvinech a k je Boltzmanova konstanta. V čistých polovodičích dále platí vztah (3):

$$n = p = n_i, \quad (3)$$

Vlastnosti polovodiče lze výrazně měnit přidáním příměsí, tzv. dotováním. Příměsí, které uvolňují elektrony se nazývají donory (koncentrace donorů = N_D). Příměsí, které zachycují elektrony z valenčního pásu a vytvářejí tak volné díry, nazýváme akceptory (koncentrace akceptorů = N_A). Dopované příměsové polovodiče rozeznáváme:

- N-typ, kde majoritními nosiči náboje jsou elektrony,
- P-typ, kde majoritními nosiči jsou díry, které se chovají jako částice s kladným nábojem.

Při spojení polovodiče typu N s polovodičem typu P, jenž mají díky příměsím rozdílné Fermiho hladiny E_F dochází k difúzi elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P. Existuje tedy tzv. vnitřní potenciál (difúzní napětí $\approx$ energetická bariéra), který je závislý na míře dotace oblastí typu N a P. Dle rovnice (4) platí závislost:

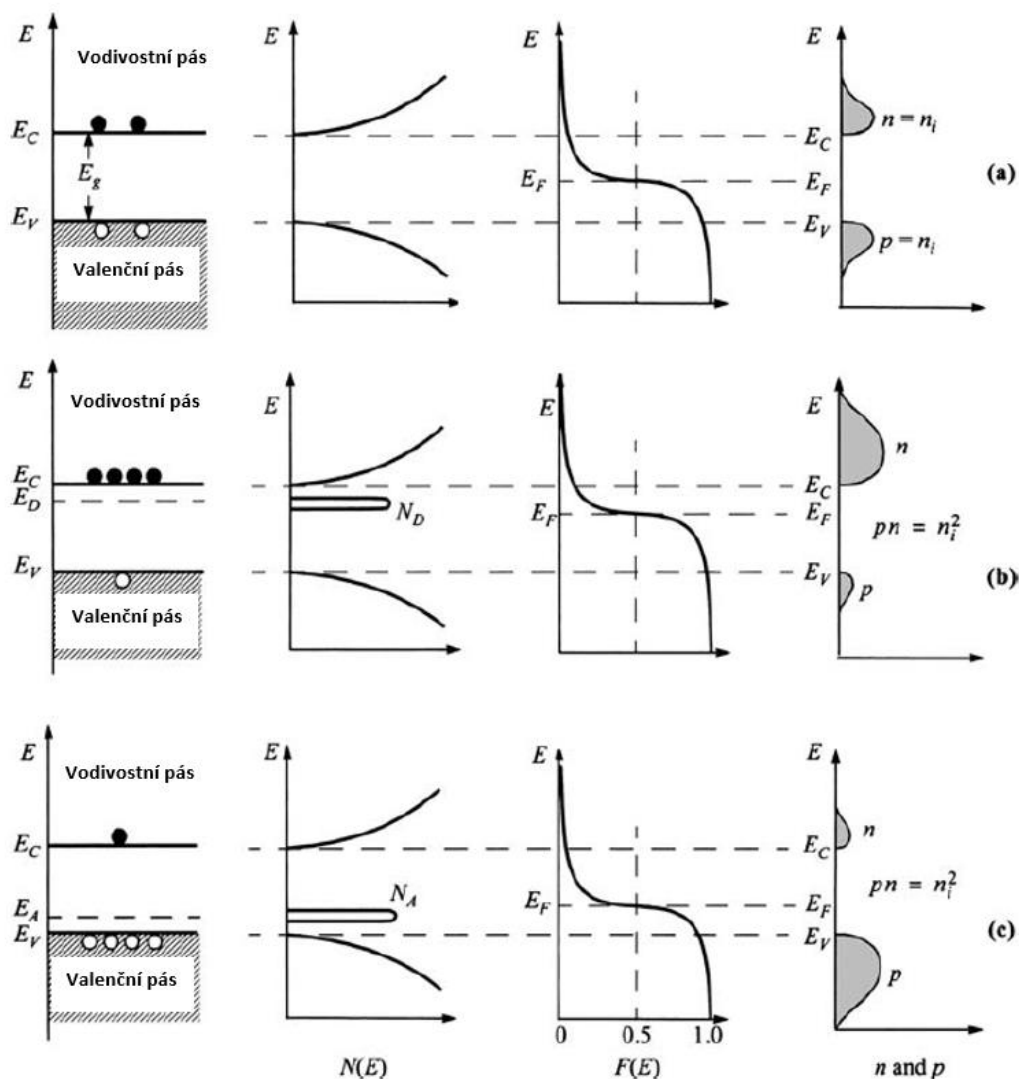
$$U_{Diff} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right), \quad (4)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T absolutní teplota, q elementární náboj elektronu, n_i je intrinšická koncentrace, N_A koncentrace akceptorů a N_D koncentrace donorů.

Fermiho hladina u vlastního polovodiče se nachází v polovině zakázaného energetického pásu mezi valenčním a vodivostním pásem [17].

Difúze elektronů probíhající na základě rozdílných E_F hladin obou polovodičů, probíhá dokud se nenavodí ustálený stav, tzn. dokud se nevyrovnají E_F hladiny obou typů polovodičů. Difúze elektronů z polovodiče typu N (materiál s vyšší Fermiho hladinou, viz obr. 9) zapříčiní vznik povrchové vrstvy nevykompenzovaného náboje iontů. V polovodiči typu N se jedná o vznik kladných iontů a v polovodiči typu P záporných iontů. Tímto na rozhraní obou polovodičů vznikne oblast prostorového náboje, která vytvoří elektrické pole (potenciálovou bariéru). Potenciálová bariéra E_g způsobuje zabránění difundování dalších elektronů. Vzniklá

přechodová oblast má podstatně menší koncentraci volných nosičů náboje. Při tomto stavu je zřejmé, že bude mít i podstatně větší elektrický odpor vůči zbylé části polovodiče.



Obr. 9: Pásový diagram hustoty stavů a) intrinstického , b) N-typu a c) P-typu polovodiče v teplotní rovnováze ($pn=n_i^2$ pro všechny tři typy) [17]

Přiložíme-li na PN přechod vnější elektrické napětí, jež má polaritu shodnou s polaritou pole E_g , pak elektrony a díry jsou ještě silněji vytlačovány od středu PN přechodu k okrajům. Šířka oblasti zvětšeného odporu se tak ještě zvětší a elektrický odpor vzroste, takže PN přechodem může téct pouze nepatrný proud, jedná se o nepropustný (závěrný) směr. Vnější pole s opačnou polaritou kompenzuje, tedy zeslabuje E_g a po dosažení mezní hodnoty ho úplně vykompenzuje, čímž volné nosiče náboje opět vyplní prostor PN přechodu. V té chvíli jeho odpor klesne na úroveň ostatních oblastí polovodiče a přechod PN propouští elektrický proud (propustný směr) [17], [18].

4.2.1 Generačně-rekombinační procesy

Tepelná energie u vlastního polovodiče způsobuje, že se malému počtu elektronů podaří překonat zakázanou oblast a dostat se do pásu vodivosti. To znamená, že při konstantní teplotě a v termodynamické rovnováze probíhá neustále generace nosičů (G), jenž je závislá na počtu již uvolněných elektronů, neboť zásoba vázaných elektronů je o mnoho řádů větší. Generace, proces při kterém je vytvořen pár elektron – díra, nastává za podmínek dle vztahu (5):

$$np < n_i^2 \quad (5)$$

Při generaci páru elektron – díra dochází ke spotřebě energie, nejčastěji pak mluvíme o generaci tepelné a světelné.

Zároveň však probíhá také opačný děj, tj. rekombinace (R), která závisí jak na počtu n volných elektronů, tak na počtu p volných děr a navíc na pravděpodobnosti rekombinace r . Rekombinace je proces zániku páru elektron - díra a stejně jako proces generace nastává v okamžiku, kdy je narušena teplotní rovnováha polovodiče, v tomto případě se ovšem energie uvolňuje. Rekombinace nastává za podmínky uvedené ve vztahu (6):

$$np > n_i^2 \quad (6)$$

Při rekombinaci elektronu přechází z povoleného stavu ve vodivostním pásu do neobsazeného stavu (díry) ve valenčním pásu. Mezi tři nejvýznamnější typy rekombinace patří přímá (zářivá) rekombinace, Augerova rekombinace a rekombinace přes příměsová centra (SRH rekombinace), viz obr. 10 [18].

Zářivá rekombinace je jev opačný k absorpci fotonu. Dochází tedy k zániknutí páru elektron – díra a vyzáření fotonu o energii odpovídající W_g (šířce zakázaného pásu). Doba života odpovídající tomuto procesu je vyjádřena vztahem (7):

$$\tau_r = \frac{1}{C_r N} , \quad (7)$$

kde C_r je rekombinační součinitel (pro Si = $1,8 \cdot 10^{-19}$) a N je koncentrace dotace (donorů nebo akceptorů).

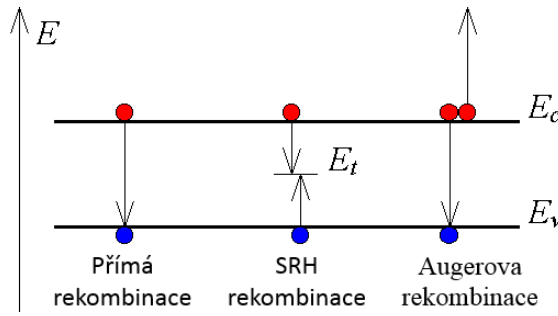
Augerova nárazová mezipásmová rekombinace probíhá při srážce tří nosičů náboje, kdy dva mohou rekombinovat a současně odevzdat energii třetímu, jenž přejde vyšší energetickou hladinu. Tento druh mezipásmové rekombinace je významný jen pro silně dotované polovodiče. Doba života volného nosiče náboje v N-typu polovodiče je vyjádřena (8), kde C_{An} je koeficient Augerovy rekombinace pro polovodič typu N a N_D je koncentrace donorů [18].

$$\tau_A = \frac{1}{C_{An} N_D^2} \quad (8)$$

Posledním výše jmenovaným typem rekombinace je rekombinace přes příměsová centra. Z hlediska detekce defektů se jedná o nejzajímavější rekombinační děj z výše uvedených. Energetické hladiny v prostoru zakázaného pásu, jejichž příčinou jsou právě defekty (příměsy) v polovodiči, se označují jako pasti (z anglického traps, E_t), které umožňují rekombinaci. Volný elektron přeskakující z vodivostního pásu je zachycen energetickou hladinou defektu (pastí), z níž následně přeskočí k valenčnímu pásu, kde dojde k rekombinaci s dírou. Nadbytečná energie elektronu se převážně uvolní jako tepelná energie (ve formě fononů). Tento proces je pojmenován podle Williama Shockleyho, Williama Thorntona Read a Roberta N. Halla, proto bývá tato rekombinace označována jako SRH rekombinace. Doba života volného náboje při této rekombinaci je vyjádřena rovnicí (9):

$$\tau_t = \frac{1}{C_t N_t}, \quad (9)$$

kde koeficient C_t závisí na záchytném průřezu rekombinačních center a jejich energetické hladině a N_t vyjadřuje kokoncentraci těchto center.



Obr. 10: Přímá (zářivá), Augerova a SRH rekombinace

V nerovnovážném stavu, což je normální případ pro solární článek v provozu, rozdíl rekombinace a generace není nulový, ale má nějakou hodnotu. Vzhledem k tomu, že rekombinace je většinou (ovšem ne vždy) větší než generace v podmínkách nerovnováhy, pak hodnota U vyjadřuje čistou míru rychlosti rekombinace, jenž je pro jednoúrovňový defekt dána vztahem (10):

$$U_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)}, \quad (10)$$

kde τ_{p0} je doby života kladného nosiče náboje (díry) a τ_{n0} je doba života záporného nosiče náboje (elektronu) a proměnné p_1 a n_1 jsou koncentrace nosičů vyjádřeny dle rovnic (11) :

$$p_1 = N_v \exp\left(\frac{E_c - E_g - E_t}{kT}\right), \quad n_1 = N_c \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right), \quad (11)$$

v nichž N_v a N_c jsou vyjadřují efektivní hustoty stavů ve vodivostním a valenčním pásu. E_c , E_g a E_t představují energie vodivostního, zakázaného pásu a energetickou hladinou defektu [18], [19].

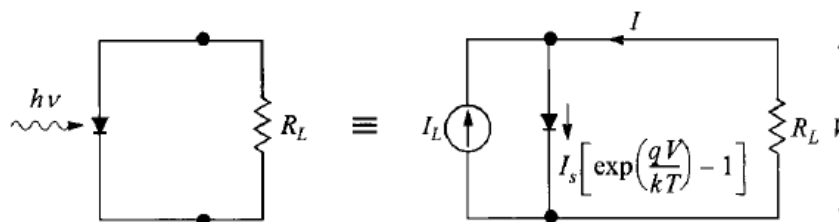
Objem a povrch křemíku obsahuje velké množství defektů s energetickými hladinami umístěnými zejména uvnitř zakázaného pásu polovodiče. Jak již bylo řečeno výše, tyto defekty (pasti) jsou příčinou dvoustupňového rekombinačního procesu. V prvním kroku je volný elektron přeskakující z vodivostního pásu je zachycen energetickou hladinou pasti a v druhém kroku z ní následně přeskočí k valenčnímu pásu, kde dojde k rekombinaci s dírou. Na základě toho rozeznáváme dva druhy Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinace, tj. v objemu a na povrchu. Samotný povrch solárního článku představuje rozsáhlou poruchu krystalické mřížky, narušením její periodicity. Příměsová centra na povrchu vznikají především díky poškození povrchu solárního článku při jeho výrobě. Hustota defektů přímo ovlivňuje SRH rekombinační rychlost. Vysoké rychlosti této rekombinace nastávají za podmínek, kdy je přibližně rovná koncentrace elektronů a děr. K tomu, abychom tuto rychlost snížili, je zapotřebí snížit koncentraci jednoho nosiče z páru elektron díra na povrchu. To se v praxi provádí u SC nejčastěji dvěma způsoby, kdy je vytvořeno vnitřní elektrické pole těsně pod povrchem polovodiče [20]:

- pasivace vytvořením izolační vrstvy s elektrostatickým nábojem
- implementace dotačního profilu těsně pod křemíkový povrch

Obě tyto varianty můžeme vidět na obr. 7. Na přední straně solárního článku je hustota povrchových defektů výrazně snížena růstem (SiO_2) nebo depozicí (SiN_x) pasivační vrstvy. Zvýšení dopantů (implantace dotačního profilu) se používá převážně pro redukci rekombinačních ztrát na zadní straně SC. Tato vrstva bývá nazývána jako tzv. back surface field (BSF). Obdobným způsobem jsou ošetřeny lokální, více dopované oblasti na přední straně SC pod kontakty [20].

4.3 Elektrické vlastnosti solárního článku

Solární článek a jeho výkon může být úplně popsán při osvětlení voltampérovou charakteristikou. Ideální zapojení SC při osvětlení je zobrazeno na obr. 11, kde konstantní zdroj fotoproudu (I_L) je umístěn paralelně s PN přechodem a odpor zátěže představuje R_L .



Obr. 11: Ideální náhradní model solárního článku při osvětlení [17]

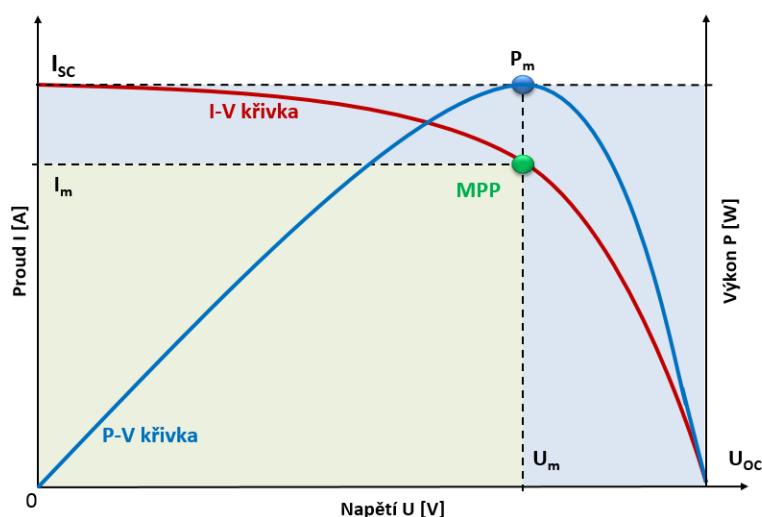
Průběh voltampérové charakteristiky SC (fotodiody) můžeme přibližně (při zanedbání vlivu vnitřních odporů článku) popsat následujícím vztahem (12):

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] - I_L, \quad (12)$$

kde I je proud který článek dodává do zátěže, U je napětí na svorkách článku při dané zátěži, I_L je fotoproud úměrný toku slunečního záření, I_s je saturační proud, e je náboj elektronu, k je Boltzmanova konstanta a T je termodynamická teplota článku.

Modelový příklad VA charakteristiky solárního článku je uveden na obr. 12. Parametry solárního článku při osvětlení (viz obr. 12) jsou popsány v textu níže. Za základní tři parametry můžeme považovat [21]:

- I_{SC} - proud na krátko
- I_{450} - proud při napětí 450 mV
- U_{OC} - napětí naprázdno (open circuit voltage)



Obr. 12: Modelová VA charakteristika solárního článku [22]

Zkratový proud I_{SC} vyjadřuje proud tekoucí solárním článkem při nulovém napětí U_{OC} . I_{SC} odpovídá výše odvozenému fotoproudu, jestliže sériový odpor R_{SO} je nulový.

Napětí naprázdno (z anglického open circuit voltage) U_{OC} je napětí bez zátěže, získáno při nulovém proudu. Za předpokladu ideálního případu, kdy $I_{SC} = 0A$ a sériový odpor R_{SO} také nulový a zároveň paralelní odpor SC je nekonečně velký, můžeme odvodit vztah (13):

$$U_{OC} = \frac{kT}{q} L_n \left[\frac{I_L}{I_s} + 1 \right], \quad (13)$$

v němž U_{OC} je dán poměrem I_L/I_S , což je vlastně absorpcí a procesem generace světlem a účinností, se kterou nábojové nosiče dosáhnou ochuzené oblasti v PN [21].

Proud při napětí 450 mV (I_{450}) určuje proud tekoucí článkem při napětí 450 mV. Tento parametr je dán mezinárodním standardem IEC 60904-1 (v ČR popsáno v technické normě ČSN EN 60904-1 - Fotovoltaické součástky: Měření voltampérových charakteristik fotovoltaických součástek s více přechody). Měření se provádí při intenzitě osvětlení 1000 W/m², spektrální složení světla musí odpovídat slunečnímu spektru (AM 1,5) a teplota okolí je stanovena na 25 °C. Ze získané hodnoty proudu určujeme třídu fotovoltaického článku pro rozdělení do výkonnostních skupin.

Dalšími důležitými parametry při měření SC jsou:

- Vnitřní odpory solárního článku (R_{SO} a R_{SH})
- Maximální pracovní bod (Maximal Power Point – MPP)
- Faktor „plnění“ výkonu Fill Factor (FF)
- Účinnost přeměny zářivé energie na elektrickou (E_{EF})

R_{SO} je sériový odpor solárního článku, je dán sklonem VA křivky v okolí bodu U_{OC} . Sériový odpor vyjadřuje součet všech dílčích odporů ve struktuře solárního článku, tedy odpor substrátu, odpor N⁺ vrstvy, kontaktní odpor mezi křemíkem a metalizací a vrstvý odpor metalizace. Paralelní odpor R_{SH} solárního článku je dán sklonem VA křivky v okolí bodu I_{SC} a charakterizuje kvalitu PN přechodu z hlediska interních zkratů. Tyto dva parametry napovídají mnohé o kvalitě solárního článku. Příliš nízká hodnota paralelního odporu nás informuje o vadném článku, který se chová jako by byl zevnitř zkratován. Příliš vysoká hodnota sériového odporu způsobuje, že svorkové napětí fotočlánku bude tím menší, čím bude větší úbytek napětí na sériovém odporu. Proud procházející solárním článkem pak můžeme v rámci tohoto tvrzení úpravou rovnice (12) vyjádřit jako vztah (14) :

$$I = I_L - I_S \left[\exp\left(\frac{e(U + IR_{SO})}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_{SO}}{R_{SH}}, \quad (14)$$

kdy v případě, že sériový odpor je malý a paralelní odpor velký, což je typické pro kvalitní článek, pak můžeme jejich vliv zanedbat a opět použít zjednodušený zápis daný rovnicí (12) [19].

MPP je optimální pracovní bod solárního článku, pro který dodává maximální výkon (P_m). Tento bod leží na VA charakteristice ve vrcholu, který je dán průsečíkem proudu při maximálním výkonu (I_m) a napětí při maximálním výkonu (U_m) solárního článku (viz obr. 12). Platí tedy, že maximální možná plocha (výkon P_m) pro danou proudově-napěťovou charakteristiku určuje faktor plnění (FF), jenž je definován vztahem (15):

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{OC} I_{SC}}, \quad (15)$$

Pro články s dobrou konverzní účinností se obvykle tyto hodnoty pohybují od 0,7 do 0,9 [21].

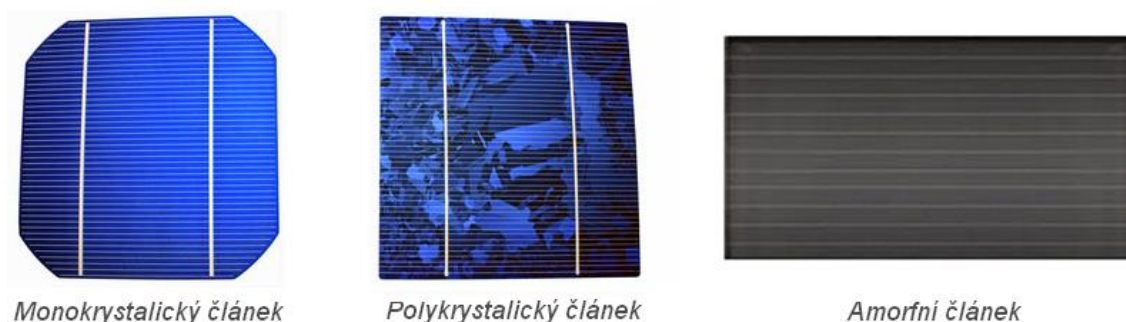
Při výpočtu účinnosti energetické konverze (E_{EF}) solárního článku, posuzujeme kolik dopadajícího záření se přemění v elektrickou energii. Důležitým předpokladem je známá hodnota intenzity slunečního záření. Účinnost je dána vztahem (16):

$$E_{EF} = \frac{U_m I_m}{p_{in}}, \quad (16)$$

kde p_{in} je celková energie dopadajícího slunečního záření na solární článek.

4.4 Typy článků dle použitého materiálu

V dnešní době se stále setkáváme nejčastěji se základním rozdělením solárních článků dle použitého materiálu do tří skupin, a to monokrystaly, polykrystaly a amorfni křemík. Typické příklady těchto článků jsou zobrazeny na obr. 13.

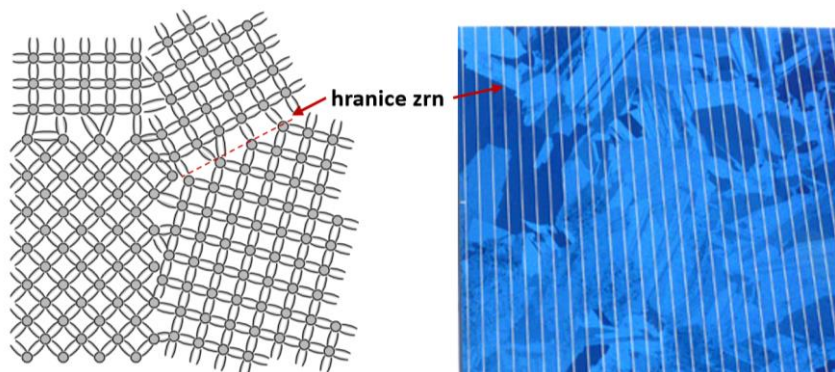


Obr. 13: Rozdělení solárních článků dle použitého materiálu [14], [3]

Monokrystalický křemík má periodicky se opakující strukturu se stejnými vlastnostmi v celém objemu monokrystalu. Monokrystaly jsou anizotropní látky. Vyrábí se nejčastěji Czochralského metodou (CZ). Na malém monokrystalu postupně tažením z taveniny narůstá nový velký monokrystal. Při růstu se mohou do taveniny uvolňovat oxidy z křemičité nádoby, jež vytváří defekty v materiálu [3].

Polykrystalické (multikrystalické) články se vyrábějí odléváním čistého křemíku do forem a řezáním takto vzniklých ingotů na tenké plátky. Materiál na polykrystalický ingot se tedy roztaví a nalije do formy, kde se nechá pomalu definovanou rychlostí chladnout. Proces chladnutí musí být řízený a pomalý. Účelem je vytvořit co největší monokrystalická zrna, tak aby bylo v materiálu co nejmenší množství dislokací, pnutí aj. Je zřejmé, že odlévání je

podstatně jednodušší než metoda tažení u mono-Si. Vzniká tak možnost připravit solární články se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem. Polykrystalický (multikrystalický) křemík má ve struktuře jednotlivé části křemíku v podobě krystalových zrn, jenž jsou nepravidelně uspořádány, jak můžeme vidět na obr. 14. Polykrystaly jsou izotropní látky.



Obr. 14: Hranice zrnitosti v poly-Si [23]

Jednotlivé částice mají periodickou strukturu, v celém objemu jsou však uspořádány náhodně. Na hraně jednotlivých zrn se vyskytují svodové odpory, díky kterým mají poly-Si články menší účinnost oproti mono-Si. Nejen hranice zrn ale i další defekty krystalu tvoří pro elektrony potenciálové bariéry. Zásadní výhodou poly-Si článků však zůstává to, že výchozí surovina je levnější a lze ji vyrábět ve větších rozměrech a s obdélníkovým nebo čtvercovým tvarem [3].

Amorfní křemík je typ křemíku, jenž byl vyvinut s ohledem na snížení výrobních nákladů, vzhledem k rostoucí nedostupnosti křemíkového materiálu. Jedná se o tenkovrstvou technologii. Článek má několikanásobně tenčí absorpční polovodičovou vrstvu. Vhodnost použití je u zařízení s menšími výkony. Amorfní moduly dosahují oproti monokrystalu přibližně poloviční účinnosti [3].

4.5 Defekty solárních článků

V křemíkových solárních článcích existují různé druhy poruch či defektů, jež můžeme rozdělit do dvou základních skupin na materiálové poruchy a poruchy vznikající ve výrobním procesu. Materiálové poruchy jsou charakteristické tím, že vznikají při výrobě křemíku. Za nejznámější považujeme [19]:

- vírový defekt
- mechanická poškození
- vnitřní pnutí materiálu
- dislokace
- hranice zrn

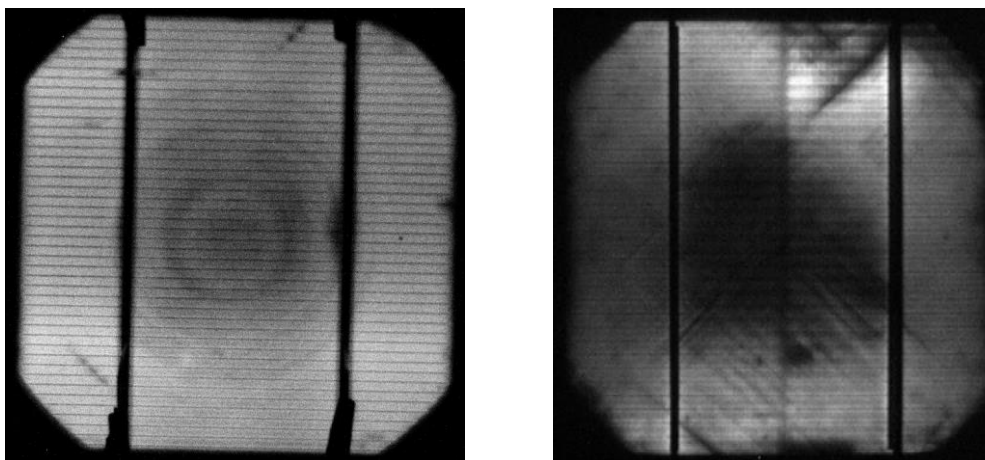
Za procesní defekty, neboli defekty vzniklé ve výrobním procesu jsou považovány např.

- nehomogenita difúzní vrstvy
- mechanická poškození
 - poruchy kontaktů (finger interruptions)
 - úštěpky hran SC
 - škrábance
 - prachové částice
- lokální zkraty (local shunts)

Zvláštní postavení má skupina defektů, nazývaná v odborné literatuře jako micro-cracks, tedy mikropraskliny. Tvorba těchto defektů přímo souvisí s mechanickou pevností materiálu a zároveň způsobu zpracování solárních článků [24].

4.5.1 Materiálové defekty

Vírový defekt patří mezi nejznámější materiálové defekty. Je zapříčiněn injekcí příměsi kyslíku při tažení křemíkového ingotu. Charakteristickým znakem tohoto defektu jsou oblasti generující nižší fotoelektrický proud, uspořádané do soustředných kružnic, což vyplývá z podstaty Czochralského metody výroby monokrystalického křemíku. Ukázku vírového defektu z vlastního měření metodou EL můžeme vidět na obr. 15 [19].

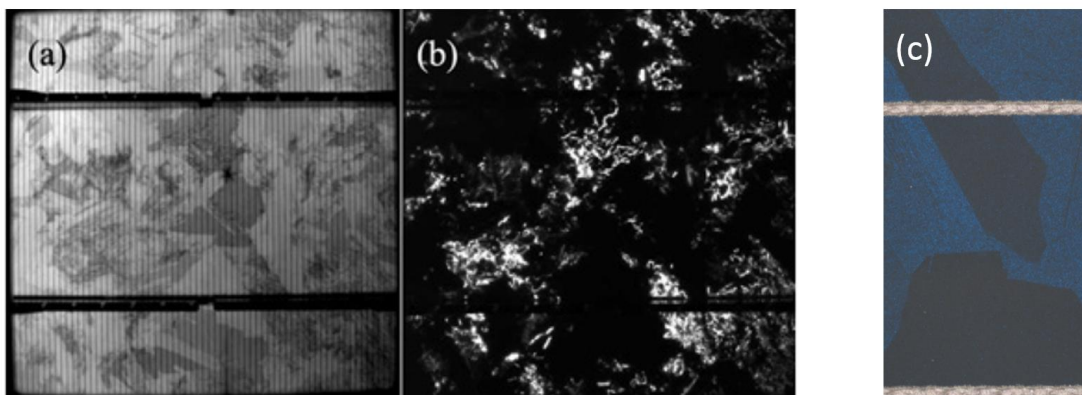


Obr. 15: Vírový defekt (vlevo) a vnitřní pnutí křemíkového článku (vpravo, [19]) zobrazeny metodou EL

Vnitřní pnutí křemíku vzniká již při tažení ingotu křemíku. Příčinou této poruchy základního materiálu je právě rychlý růst ingotu, jež má za následek porušení struktury křemíku (viz. obr. 15) Rychlou možností, jak tento defekt detekovat, je metoda elektroluminiscence nebo fotoluminiscence [19].

Defekty jako dislokace (čárová porucha mřížky krystalu, vznikající dislokací – posuvem atomových rovin vůči sobě) a hranice zrn jsou typické pro levnější polovodičový materiál, jímž

bývá polykrystalický křemík. Na obr. 16 je uveden příklad zrnitosti poly-si článku z vlastního měření optickou mikroskopií a dále pak luminiscence dislokací v poly-si, jenž mohou být viděny při vlnových délkách delších než 1350nm.

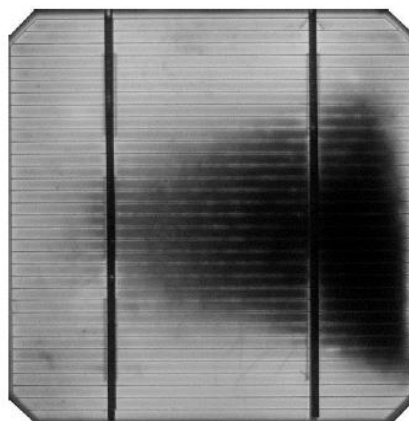


Obr. 16: Standardní EL (a), Sub-bandgap luminiscence s dislokacemi (b) [25], zrna v poly-Si (c)

4.5.2 Výrobní (procesní) defekty

▪ Nehomogenita difúzní vrstvy

Jak již název napovídá, nehomogenita difúzní vrstvy vzniká při procesu difúze, kdy je vytvářena tenká vrstvička polovodiče typu N (emitor) dotací křemíku plynným fosforem. Nehomogenita emitorové vrstvy může vzniknout například vlivem nerovnoměrného rozložení teploty v difúzní peci nebo vniknutím nečistot do plynného fosforu při samotném procesu difuze [26].

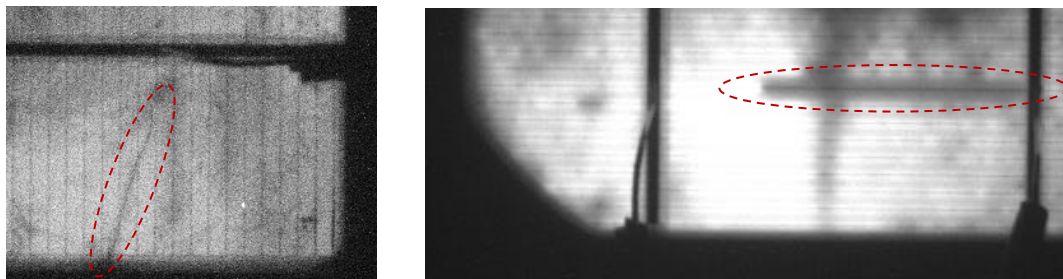


Obr. 17: Nehomogenita vrstvého odporu difúzní vrstvy zobrazena metodou EL

▪ Mechanická poškození

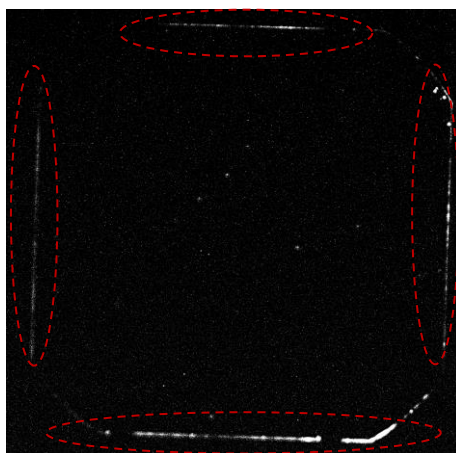
Mechanická poškození jsou defekty vzniklé ve výrobním procesu. Příčinou může být nešetrné zacházení s jednotlivými články nebo chybný technologický postup. Na obr. 18 je v detailu vidět poškrábání článku (vlevo) a porucha kontaktů - finger interruptions (vpravo).

Přerušení kontaktu (finger interruptions) může být způsobeno různými vlivy, mezi nejčastější patří chyba při sítotisku, přerušení tenkého kontaktu (prstu) na propojovacím „tlustém“ kontaktu (bus bar-u) a přerušení prstu na prasklině (crack-u) [25].



Obr. 18: Detail poškrábání solárního článku (vlevo) a porucha kontaktů (vpravo)

Do této kategorie defektů je možno zařadit i další poškození SC jako např. úštěpek hrany (zhmožděná hrana) solárního článku způsobující zkrat přední a zadní strany SC. Vlastní poškození hrany může vzniknout při ořezávání přebytečného materiálu a tvarování do požadovaného čtvercového tvaru nebo při nešetrné manipulaci. V oblasti zhmožděné hrany dochází už při malých závěrných napětích ke vzniku mikroplazmy. Na obr. 19 nalezneme poškozené hrany SC pozorovány právě metodou mikroplazmy, jenž je nejvhodnější pro zobrazení tohoto typu defektu solárního článku. Do kategorie mechanického poškození SC pak dále můžeme zařadit prachové částice, mikropraskliny aj.

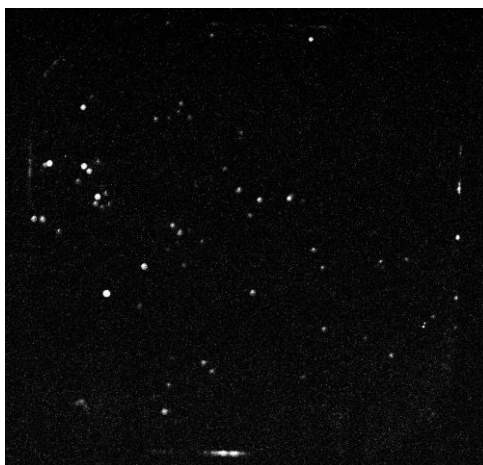


Obr. 19: Zhmožděná hrana SC pozorována metodou mikroplazmy a mikroprasklina

▪ **Lokální zkraty (local shunts)**

Tyto defekty jsou někdy také označovány za „power generation defects“, jednoduše řečeno defekty generující v aktivním stavu článku teplo. Pozorování emise světla v místech vzniku lokálních center mikroplazmy je ideální nástroj pro detekci těchto defektů, na obr. 20 si můžeme všimnout jasně bílé svítících lokálních defektů. Kromě luminiscenčních detekčních metod je

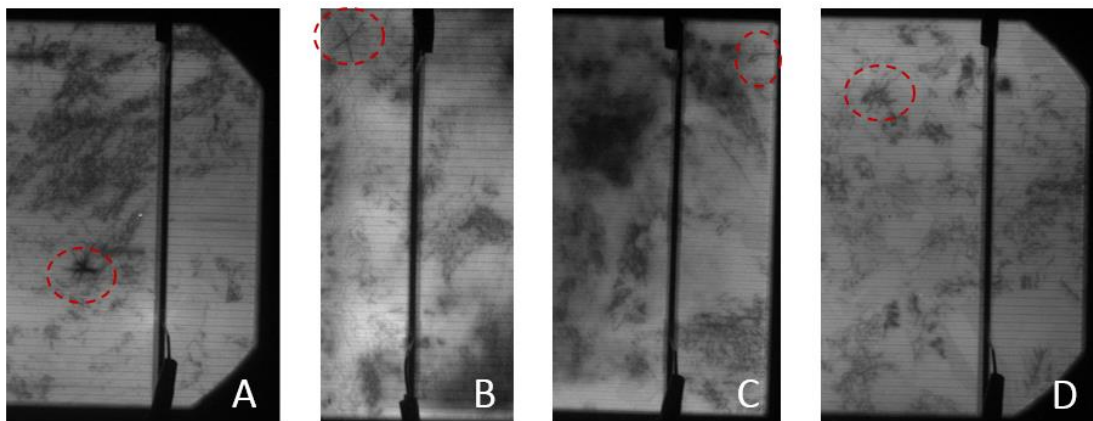
lze rozeznat pomocí IR termografie. Jak je popsáno v textu níže, tato metoda pracuje na principu detekce tepelného záření v infračervené části spektra.



Obr. 20: Lokální zkratky (local shunts), metoda luminiscence mikroplazmy

4.5.1 Micro-cracks (mikropraskliny)

Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, zvláštní postavení má skupina defektů, nazývaná v odborné literatuře jako micro-cracks, tedy mikropraskliny. Tyto defekty jsou zařazeny do samostatné kategorie, jelikož se svým způsobem dají zařadit do obou skupin, tedy do materiálových i výrobních. Tvorba těchto defektů přímo souvisí s mechanickou pevností materiálu a zároveň se způsobem zpracování solárních článků.



Obr. 21: Typické mikropraskliny pozorované při vlastním výzkumu

Při analýze mikroprasklin metodou electroluminescence u poly-Si článků se setkáváme se dvěma typy, a to mikropraskliny rozlišitelné, tedy ty které jsou na první pohled zřejmé a druhá skupina bývá označována jako zaměnitelné. U druhé skupiny často dochází k chybným závěrům, kdy jsou hranice zrn zaměňovány za mikropraskliny a naopak. Této problematice se podrobně věnuje např. Matthias Demant v článku MICRO-CRACKS IN SILICON WAFERS

AND SOLAR CELLS [27]. V předkládané práci pak bude věnována část kapitoly 6.5.4 konkrétně luminiscenční mikroskopii mikroprasklin (mikro analýzy metodou PEM) respektive chybně detekovaným hranicím zrn.

4.6 Souhrn diagnostických metod detekce defektů solárních článků

Analýza parametrů solárních článků má v současné době jednu z nejvýznamnějších rolí při jejich výrobě. Diagnostika solárních článků, či celých panelů, je velmi rozsáhlý vědní obor. Je známo mnoho diagnostických metod solárních článků rozlišujících různorodé defekty krystalické mřížky jako např. dislokace, hranice zrnitosti, mikropraskliny, mechanická poškození, lokální zkraty aj. Pro levnější polovodičový materiál, jímž bývá polykrystalický křemík, jsou prvně jmenované defekty typické. Mezi běžné diagnostické metody k detekci defektů solárních článků patří dle [28] a [29] například:

- **Elektroluminiscence**

Princip této metody spočívá ve vybuzení světelného záření v solárním článku přiloženým elektrickým polem. Solární článek je zapojen v propustném směru. Typický snímek polykrystalického solárního článku metodou elektroluminiscence můžeme vidět např. na obr. 15. Metoda elektroluminiscence se používá napříč polovodičovým průmyslem v různých modifikacích. Měření EL s využitím optického mikroskopu se používá k detekci defektů polovodičových obvodů. Metoda bývá označována jako mikroskopie fotonové emise (Photon Emission Microscopy – PEM [30]).

- **Luminiscence mikroplazmy**

Princip této metody spočívá ve vybuzení světelného záření v solárním článku přiloženým elektrickým polem. Solární článek je zapojen v závěrném směru.

- **Fotoluminiscence**

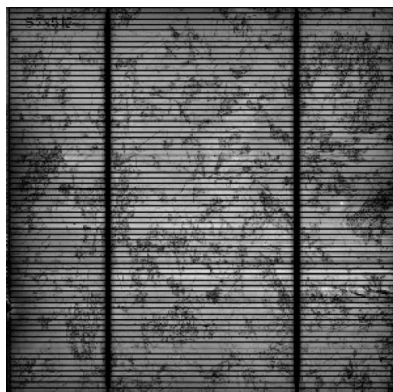
Princip této metody spočívá ve vybuzení světelného záření v solárním článku dopadajícím světelným zářením.

- **LBIV (Light Beam Induced Voltage)**

Princip této metody, kdy světelný paprsek skenuje povrch solárních článků a pomocí měřicího zesilovače je vytvářena napěťová mapa odezvy.

▪ LBIC (Light Beam Induced Current)

Princip této metody, kdy světelný paprsek skenuje povrch solárních článků a pomocí měřicího zesilovače je vytvářena proudová mapa odezvy. Typický snímek polykrystalického solárního článku metodou LBIC můžeme vidět na obr. 22.



Obr. 22: Typický snímek polykrystalického solárního článku metodou LBIC [29]

▪ EBIC (Electron Beam Induced Current)

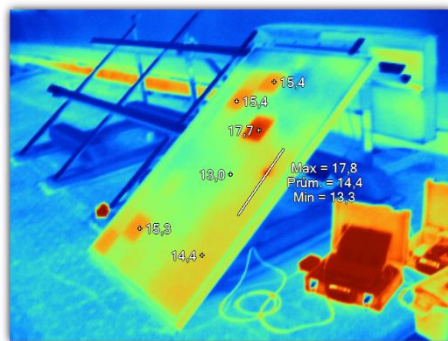
Na podobném principu jako výše uvedené metody LBIV a LBIC je založena metoda EBIC, jejíž zjednodušené schéma je zobrazeno na obr. 23. Ta je používána především pro velmi malé vzorky, při které se vyhodnocuje proudová odezva solárního článku na dopadající elektronový svazek ve skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Princip SEM je rovněž popsán v této kapitole [31].



Obr. 23: Principiální schéma metody EBIC [32]

▪ ILIT (IR Thermography)

Metoda pracuje na principu detekce tepelného záření v infračervené části spektra, která je pro lidské oko neviditelná. Typický snímek celého solárního panelu termo-kamerou můžeme vidět na obr. 24.



Obr. 24: Typický snímek celého solárního panelu termo-kamerou [28]

▪ VA analýza solárním simulátorem

Jedná se o měření elektrických parametrů solárních článků. Měření voltampérových charakteristik solárního článku probíhá za podmínek stanovených standardem ASTM E927-05 (Standard Specification for Solar Simulation for Terrestrial Photovoltaic Testing), souladu s ČSN EN 60904. Sluneční simulátor je zařízení poskytující uniformní světelné záření (blízké slunečnímu záření) o intenzitě 1000 W/m^2 . Odpovídá tak spektru AM1.5 slunečního záření. Měření probíhá při konstantní teplotě 25°C [19].

Mezi nejpoužívanější solární simulátory patří kontinuální a zábleskové (FLASH tester) testery. Na kontinuálním simulátoru, jak již název napovídá, probíhá kontinuální měření za konstantní intenzity záření. Postupně se v průběhu osvětlení zvyšuje či snižuje zátěž připojená mezi kontakty solárního článku a při každé změně zátěže se změří hodnota napětí a proudu až do mezních hodnot I_{sc} a U_{oc} .

Na rozdíl od kontinuálních simulátorů, pulzní simulátory fungují na principu záblesků. Zábleskový sluneční simulátor využívá tzv. flasher (blikač) k vytvoření požadovaných parametrů světla. Hlavním důvodem pro využití zábleskového světla je minimalizovat ohřev solárního článku v průběhu testování. V okamžiku optimální intenzity světla je vytvořena I-V charakteristika článku nebo modulu [33].

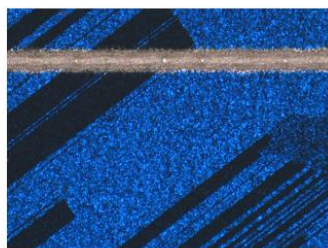
▪ Optická mikroskopie (OM)

Optická mikroskopie umožňuje pozorovat objekty a struktury do tisíce-násobného zvětšení bez speciálních úprav mikroskopu. Samotný mikroskop se skládá ze dvou hlavních částí – objektivu a okuláru. OM patří mezi jednoduché zobrazovací metody, nacházející široké uplatnění v průmyslových i výzkumných laboratořích. Slouží pro zobrazení a hlavně zvětšení (přiblížení) širokého spektra barevných i nebarevných materiálů [34].

V této práci byl využit optický mikroskop NIKON ECLIPSE L200N (viz obr. 25) k analýze povrchu zvláště poly-si článků. Výsledné snímky topografie povrchu solárního článku byly následně korelovány s metodou elektroluminescence. Na obr. 25 je zobrazen povrch poly-Si článku se zřetelnými hranicemi zrn.



Zrna polykrystalu zobrazeného pomocí metody OM



Obr. 25: NIKON ECLIPSE L200N [35]

▪ FIB-SEM (Focused ion beam scanning electron microscopy) analýza

Elektronový mikroskop je v podstatě obdobou výše popsaného optického mikroskopu, kde jsou fotony nahrazeny elektrony a optické čočky elektromagnetickými čočkami.



Obr. 26: Pracoviště elektronové mikroskopie Tescan Fera 3

Jako vhodná analýza defektů a struktury solárních článků je v této práci použit skenovací elektronový mikroskop (SEM). Konkrétně typ Tescan Fera 3 Dual Beam, poskytnutý firmou ON Semiconductor Czech Republic, s.r.o.(viz obr. 26). Tato analýza poskytuje možnost pozorovat detaily vzorku daleko za hranicí optických mikroskopů. Oproti optickým

mikroskopům používá SEM jako zdroj záření fokusovaný elektronový svazek o kratší vlnové délce. Technologie FIB je velice podobná, ovšem použitý je iontový svazek místo elektronového. FIB-SEM analýza kombinuje tedy dva svazky (elektronový a iontový) v jednom unikátním zařízení. Jednoduše lze říci, že SEM poskytuje zobrazení analyzovaného vzorku ve vysokém rozlišení a FIB umožňuje modifikaci daného vzorku [31].

Základní struktura skenovacího elektronového mikroskopu spočívá v průchodu primárního elektronového svazku soustavou elektromagnetických cívek, které slouží k ostření svazku. Následující vychylovací cívky zajistí rastrování a určení rychlosti pohybu svazku po měřeném vzorku.

Ve výše uvedeném textu byl představen soubor nejběžnějších diagnostických metod detekce defektů solárních článků. V další části předkládané práce budou podrobněji rozebrány a popsány především luminiscenční metody. Podle způsobu vybuzení luminiscenčního záření z křemíkových solárních článků budeme tedy hovořit zejména o metodách elektroluminiscence a pozorování mikroplazmy.

5 Luminiscence

Cílem této kapitoly je podrobněji vysvětlit a objasnit luminiscenci křemíku, jakožto proces zářivé rekombinace párů elektron-díra. Poukázat na dosavadní vývoj v oblasti diagnostiky solárních článků pomocí luminiscence a její možnosti a přednosti pro další uplatnění při charakterizaci polovodičových materiálů a zařízení.

5.1 Definice luminiscence

Ivan PELANT a Jan VALENTA v knize Luminiscenční spektroskopie [36] definují luminiscenci takto:

Luminiscenci pevných látek rozumíme přebytek elektromagnetického (světelného) záření, které látka vysílá, nad zářením rovnovážným popsáním Planckovým vyzařovacím zákonem. Přitom musí platit, že toto záření má dobu dohasínání podstatně delší, než perioda světelných oscilací ($10^{-14} - 10^{-15}$ s).

Z výše uvedené definice vyplývá, že kniha je zaměřena pouze na luminiscenci pevných látek, tedy stejně jako zde předkládaná práce. Pro úplnost můžeme dodat, že luminiscence je samovolné nerovnovážné záření obvykle pevných nebo kapalných látek, jemuž můžeme rozumět jako přebytku elektromagnetického (světelného) záření látky nad úroveň jeho rovnovážného elektromagnetického záření v dané spektrální oblasti při dané teplotě.

Jinými slovy to znamená, že látce je nutno dodat nadbytečnou energii oproti energii, jež si látka vzájemně vyměňuje se svým okolím pomocí rovnovážného elektromagnetického záření. Z pohledu kvantové mechaniky se jedná o zářivou rekombinaci. Nadbytečná energie elektronu se při přeskočení z energeticky výše položeného pásu do energeticky níže položeného pásu uvolní v podobě fotonu. Jedná se o obrácený jev k excitaci elektronu z níže energeticky položeného pásu do výše energeticky položeného pásu pomocí dopadajícího fotonu, který je využíván ke generaci volných nosičů v polovodičových solárních článcích. Tyto jevy jsou v některých případech inverzní (generačně-rekombinační jevy) [37], [38].

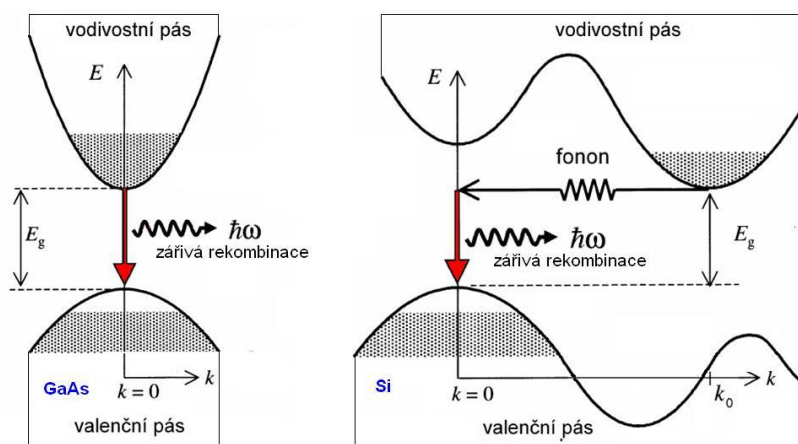
Tepelné emise na pozadí luminiscence je popsána Planckovým zákonem pro vyzařování v rovnici (17):

$$B_f(T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (17)$$

kde B je spektrum záření, f je frekvence daného spektra, T je absolutní teplota, h je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu a k je Boltzmanova konstanta. Podle způsobu vybudování luminiscence rozlišujeme u solárních článků tři základní typy.

5.2 Zářivá rekombinace páru elektron - díra

Při luminiscenci samozřejmě hraje významnou roli typ polovodiče v závislosti na charakteru přeskokového mechanismu mezi energetickými pásy, jenž vyplývá ze vzájemné energetické polohy minima energie vodivostního pásu a maxima energie valenčního pásu [38].



Obr. 27: E-k diagram přímého (vlevo) a nepřímého (vpravo) polovodiče [38]

Na obr. 27 je znázorněna vzájemná poloha valenčního a vodivostního pásu v E-k diagramu (vyjadřuje závislost energetického stavu elektronu jako funkce jeho vlnového vektoru k – respektive hybnosti). Z E-k diagramu je patrné o jaký typ polovodiče se jedná.

Jedná-li se o polovodič s přímým mezipásmovým přechodem, kdy maximum obou pásů leží přibližně na hodnotě vlnového $k = 0$. Pak se při přechodu elektronu zpět z valenčního do vodivostního pásu uvolní foton a hybnost a energie systému jsou zachovány. Polovodičové lasery a LED diody využívají vysoké pravděpodobnosti vyzáření fotonu o energii rovnající se šířce zakázaného pásu v místě přímého přechodu při zářivé rekombinaci páru elektron-díra. Příkladem polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem jsou např. sloučeniny arsenid galia GaAs [29].

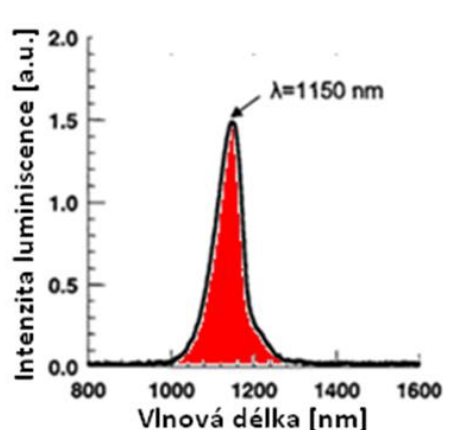
V opačném případě, tzn. u polovodičů s nepřímým mezipásmovým přechodem, je pravděpodobnost, že elektron sestoupí až do valenčního pásu a vyzáří přitom foton asi $10^{-4} \%$. Takto nízká hodnota pravděpodobnosti je dána tím, že přechody z minima vodivostního do maxima valenčního pásu vyžadují změnu hybnosti, jenž emise fotonu nezajistí. Pokud se jedná o polovodič s nepřímým mezipásmovým přechodem, pak minimum energie vodivostního pásu vzhledem k maximu energie valenčního pásu je posunuto o hodnotu k_0 . Právě křemík je polovodič s tzv. nepřímým zakázaným pásem. Můžeme říci, že generačně-rekombinačních dějů se kromě energií fotonů účastní i fonony (tepelné kmity krystalografické mřížky). Jak bylo vysvětleno, velikost vlnového vektoru emitovaného fotonu by k zachování hybnosti celého systému nestačila. Při účasti fononů je zachována hybnost systému. Fonony mají poměrně

velmi malé energie a poměrně velkou hybnost. Malá energie je v E-k diagramu zanedbána a proto se přechody fononů znázorňují horizontálně [38], [29], [39].

Výše uvedená pravděpodobnost vyzáření fotonu při rekombinačních dějích je u křemíku (jakožto zástupce nepřímého polovodiče) nízká. Pro použití v optoelektronice se nehodí, ovšem je možné metodu generování světelné emise (luminiscence) použít pro analýzu struktury polovodičových PN přechodů, jimiž jsou solární články [38], [29].

5.3 Spektrum luminiscenčního záření křemíkového solárního článku

Při fotoluminiscenčních diagnostických metodách vykazuje solární článek slabé záření – luminiscenci s maximem v infračervené oblasti. Záření emitované křemíkovým článkem má vlnovou délku přibližně 950 – 1250 nm, jak je vidět na obr. 28, maximum emitovaného záření se pohybuje kolem 1150 nm. Vlnová délka 1150 nm odpovídá bandgab energii křemíkového článku, což je vlastně energetický rozdíl mezi vrcholem valenčního pásu a spodkem kondukčního pásu. U křemíku má tato energie hodnotu 1,12 eV. Emisní intenzita fotonů je závislá na množství defektů v článku, s vyšším počtem klesá [40]



Obr. 28: Spektrum luminiscenčního záření křemíkového solárního článku [41]

5.4 Charakteristické vlastnosti luminiscence

Je důležité si uvědomit, že emitované luminiscenční záření solárního článku má vlnový charakter a dá se tedy popsat charakteristickými vlastnostmi stejně jako elektromagnetické vlnění [36]:

- *intenzitou* (počet fotonů procházejících v daném směru jednotkovou plochou za jednotku času)
- *spektrém* (spektrální hustotou fotonového toku na jednotkový interval vlnových délek nebo frekvencí)

- *koherenci* (dána vztahy mezi fázemi světelných vln)
- *dobou trvání* (je dána vnitřní dobou života excitovaného stavu, z něhož dochází k emisi)
- *polarizací* (směr kmitání elektrického vektoru elektromagnetické vlny)

5.4.1 Polarizace luminiscenčního záření

Luminiscenční záření, tzn. elektromagnetické vlnění je příčné vlnění vzájemně kolmých vektorů intenzity elektrického pole E a magnetické indukce B , jenž se řídí Maxwellovými rovnicemi. Rovina kmitajícího vektoru E se nazývá rovina kmitů elektromagnetické vlny. Pokud se zabýváme jevem polarizace, pak směr vektoru elektrické složky E je shodný se směrem polarizace. U přirozeného světla jako např. slunečního, se rovina kmitů vektoru E chaoticky mění. Takové záření nazýváme přirozené, tj. nepolarizované. Omezíme-li směr kmitání vektoru E (respektive B) nebo jeho velikost pak získáme polarizované světlo. Na základě toho mluvíme o [42]:

- lineární polarizaci, kdy vektory E kmitají stále v jedné přímce – rovině a vektor E má stále stejný směr,
- kruhové polarizaci, kdy konce vektorů E opisují kruh a velikost těchto vektorů E je konstantní, ovšem směr kmitání se mění,
- eliptická polarizace, kdy konce vektorů E opisují elipsu a vektor E mění svůj směr i velikost.

Obecně lze říci, že nepolarizované elektromagnetické vlnění se stává polarizovaným po vhodné interakci s látkou. Míra polarizace je kvantitativně popsána veličinou zvanou stupeň polarizace. Ten se definuje jako poměr intenzity vlnění polarizovaného a celkové intenzity před polarizací a nabývá hodnot nula až jedna, viz vztah (18):

$$p = \frac{I_p}{I} \leq 1, \quad (18)$$

kde I_p je intenzita polarizované vlny a I vyjadřuje celkovou intenzitu [42].

Elektromagnetické vlnění může být polarizováno několika způsoby. Zpravidla mluvíme o čtyřech základních způsobech polarizace [43]:

- Polarizace odrazem – nastává po dopadu vlnění na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi. Platí zákon odrazu, jenž říká, že úhel dopadajícího paprsku je roven úhlu odraženého. Úhel, při kterém je vlnění plně polarizováno se nazývá Brewsterův úhel.

- Polarizace lomem – ve chvíli kdy dopadá vlnění na rozhraní se část záření odráží a část záření se láme, polarizace lomem tedy nastává společně s polarizací odrazem.
- Polarizace průchodem anizotropním prostředím (polarizace dvojlomem) - nastává u anizotropních látek, v nichž je rychlost šíření vlnění závislá na směru. Po dopadu záření pak dojde k vytvoření dvou paprsků , řádného a mimořádného. Paprsek řádný splňuje zákon odrazu a lomu. Paprsek mimořádný vznikl díky anizotropii látky. Pro oba paprsky platí, že jsou plně polarizovány. Jejich vektory E jsou navzájem kolmé.
- Polarizace selektivní absorpcí – bývá označována schopnost látky rozdílně absorbovat světlo v závislosti na jeho polarizaci. Je typická pro organické látky s orientovanou vláknitou strukturou.

Obecně lze říci, že při téměř všech interakcích světla s látkou dochází k určité změně polarizace vlnění. Toho je využíváno pro zjištění informací o struktuře a složení materiálů. K polarizaci záření se využívají polarizátory. Při detekci a analýze polarizovaného záření se používají analyzátory. Ve skutečnosti však hovoříme o jednom a tomtéž prvku. Stejný optický prvek tedy může být použit jako polarizátor i analyzátor. Závisí pouze na umístění prvku v optické soustavě.

Existují dva základní typy polarizačních filtrů (respektive analyzátorů) lineární a cirkulární. V obou případech dochází po průchodu elektromagnetického vlnění filtrem k totožnému účinku, tzn. filtraci polarizovaného světla. Rozdíl však spočívá v typu filtrace, dle jeho fyzikálního principu popsaného výše.

Malusův zákon nám popisuje interakci elektromagnetického vlnění s látkou na základě vztahu intenzity prošlého záření a úhlu δ mezi rovinou polarizace vstupního svazku a propustnou osou polarizačního analyzátoru. Matematická interpretace Malusova zákona je popsána ve vztahu (19):

$$I = I_0 \cos^2 \delta, \quad (19)$$

kde I_0 představuje intenzitu vstupujícího svazku elektromagnetického vlnění [42].

5.5 Luminiscenční diagnostické metody pro analýzu solárních článků

V kapitole 4.6 byl uveden základní velmi stručný souhrn diagnostických metod detekce defektů křemíkových solárních článků. Hlubší popis nejvýznamnějších luminiscenčních metod jako elektroluminiscence, fotoluminiscence a metoda pozorování mikroplazmy bude veden textu této kapitoly.

5.5.1 Elektroluminiscence

Proudová elektroluminiscence (EL) je v současné době jednou s nejvíce používaných metod pro detekci defektů solárních článků. Tato metoda vyžaduje již kompletně dokončenou strukturu solárního článku (lze i použít pro analýzu panelů) a nelze ji použít pro diagnostiku při výrobních mezikrocích. Mezi metody, které lze využít pro diagnostiku stavu materiálu během výrobního procesu, se řadí metoda využívající detekce fotoluminiscenčního záření [44].

Elektroluminiscence je fyzikální děj, jenž je založen na principu vybuzení luminiscenčního záření v solárním článku (plošném P-N přechodu) přiloženým elektrickým polem. Jak již bylo v práci řečeno, při luminiscenci hraje významnou roli typ polovodiče v závislosti na charakteru přeskokového mechanismu mezi energetickými pásy. Z tohoto pohledu pak polovodiče můžeme rozdělit na polovodiče s přímým mezipásmovým a nepřímým mezipásmovým přechodem. U křemíku, polovodiče s nepřímým mezipásmovým přechodem, se při generačně-rekombinačních dějích kromě energie fotonů účastní i fonony, jenž představují tepelné kmity krystalografické mřížky. Při EL tedy dochází k zářivé mezipásmové rekombinaci solárního článku, zapojeného v propustném směru. Za určitých podmínek můžeme říci, že výsledný fotonový tok přímo souvisí s lokálním rozdělením kvazi Fermiho hladin $E_{Fn}-E_{Fp}$ a vychází ze vztahu (20):

$$\Phi_{EL} \propto \int_0^w U_{rad} dz = \int_0^w Bpn dz = n_i^2 \int_0^w B \left(\frac{E_{Fn}-E_{Fp}}{k_B T} \right) dz \quad (20)$$

kde w je tloušťka článku, B je materiálová konstanta, U_{rad} je celkový rozsah rekombinace, dz je uvažovaná délka válce jednotkového průřezu fotonového toku, n_i je koncentrace vlastních nosičů, p koncentrace volných děr a n koncentrace volných elektronů, k je Boltzmanova konstanta a T je teplota. Pravděpodobnost vyzáření fotonu při rekombinačních dějích u křemíku je nižší než u polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem. I tak lze elektroluminiscenci křemíku použít pro generování světelné emise za účelem detailní analýzy struktury P-N přechodu [29].

Měření probíhá při pokojové teplotě a světelná emise je snímána komerčně vyráběnou nízko-šumovou CCD kamerou. Výstupní snímky pak ukazují místa s nižší či vyšší proudovou

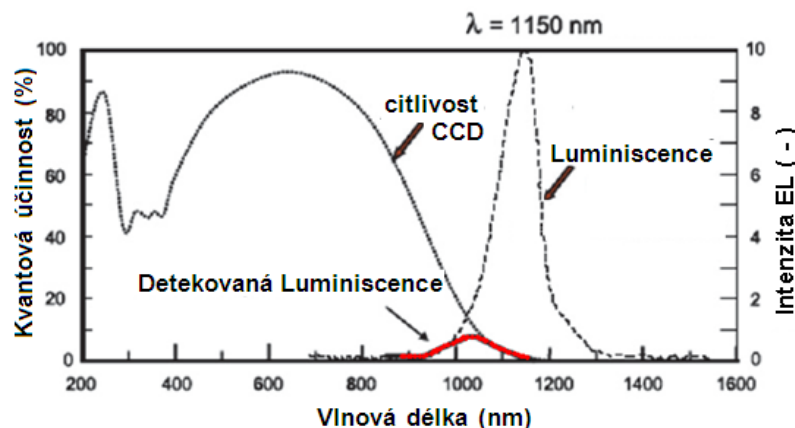
hustotou ve stupních šedi. Defekty jsou zobrazeny tmavšími oblastmi. Za prvního průkopníka této metody u solárních článků můžeme považovat Takashi Fuyukiho, jenž v roce 2005 publikoval průlomový článek *Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence* [40], [45].

5.5.2 Fotoluminiscence

Při metodě fotoluminiscence je světelná emise vyvolaná energií dopadajícího elektromagnetického záření. Tento jev se řídí dle Stokesova zákona (někdy též nazýváno Stokesův posun). Fotoluminiscence je tedy buzena světlem o vlnové délce λ_{ex} , jenž bývá obvykle kratší než luminiscenční vlnová délka λ_{em} . Stokesův zákon je uveden v rovnici (21):

$$\lambda_{ex} \leq \lambda_{em} \quad (21)$$

Stokesovo pravidlo jednoduše říká, že vybuzené záření má delší vlnovou délku než budící. Jedná se tedy o záření s menší energií než záření budící.



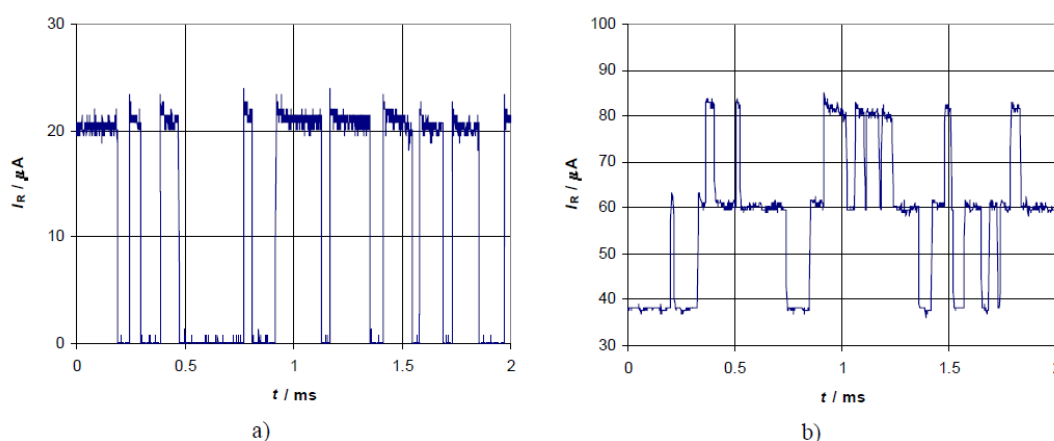
Obr. 29: Spektrální citlivost CCD kamery a intenzita luminiscence křemíku [45]

5.5.3 Mikroplazma

Při zapojení solárního článku v závěrném napětí (blížíci se průraznému napětí) můžeme pozorovat vznik lokálních center mikroplazmy v místech strukturálních křemíkových defektů. Ve velkoplošném polovodičovém prvku, jakým je solární článek, vzniká v oblastech poškozené krystalické mřížky, kde je narušen (nedokonalost krystalické mřížky, mechanická vada, nehomogenost...) P-N přechod, dochází k lokálnímu lavinovému výboji, který je doprovázen šumem. Tento šum se objevuje při dostatečně velkých závěrných napětích, ale zároveň nižších než je napětí lavinového průrazu. Impulsní mikroplazmatický šum se projevuje ve formě dvou nebo více hladinových pravoúhlých impulzů, jak můžeme vidět na obr. 30. Vznik mikroplazmy

při výboji v polovodiči je doprovázen emisí světla. Tak jako u výše uvedených metod EL a PL je emise světla detekována CCD kamerou.

V oblastech lokálních center mikroplazmy může protékat značně velký proud způsobující lokální ohřev, v krajním případě až destrukci P-N přechodu. Plocha (výkon) SC je určujícím parametrem pro velikost závěrného napětí potřebného k vyvolání mikroplazmy. Při nešetrném nastavení závěrného napětí, tedy překročení průrazného napětí, dochází k nevratným destruktivním změnám struktury P-N [29], [46].



Obr. 30: Příklad časového průběhu mikroplasmatického šumu a) dvoj-stavového, b) více-stavového [29]

Existuje několik způsobů jak detekovat vznikající mikroplazmu, nejčastěji mluvíme o metodách měření:

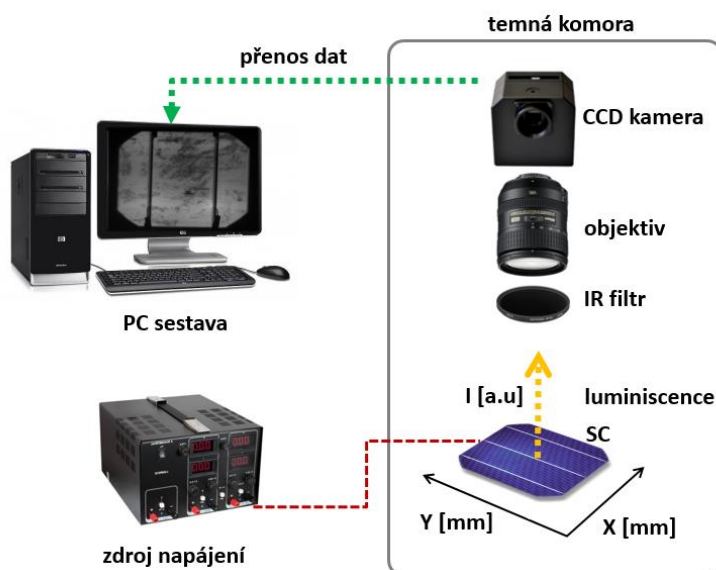
- časového průběhu proudového šumu v závěrném směru (viz obr. 30),
- charakteristik U-I při použití napájení ze stabilního proudového zdroje,
- efektivní hodnoty úzkopásmového proudového šumu při napájení v závěrném směru proudovým nebo napět'ovým zdrojem,
- emise světelného záření z bodových defektů vznikající během formování mikroplasmatických výbojů.

Na rozdíl od EL a PL, kde jsou defekty reprezentovány tmavými oblastmi, je vznik lokálních center mikroplazmy v místech strukturálních křemíkových defektů zobrazen jako svítící „bílé“ oblasti.

5.5.4 Měřicí pracoviště metody elektroluminiscence a mikroplazmy

Základní měření metodou elektroluminiscence (znázorněno na obr. 31) obvykle probíhá při pokojové teplotě a světelná emise je snímána CCD detektorem (v laboratoři fotovoltiky na ústavu elektrotechnologie VUT v Brně se jedná o komerčně vyráběnou nízko-šumovou CCD

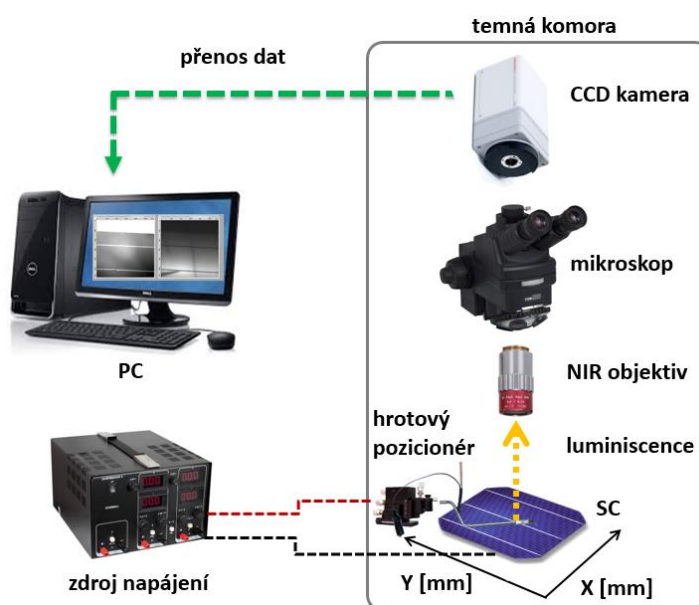
kameru – model G2-3200). Výstupní snímky pak ukazují místa s nižší či vyšší proudovou hustotou a jsou ve stupních šedi.



Obr. 31: Základní sestava měřicího pracoviště metody elektroluminiscence

5.5.5 Měřicí pracoviště luminiscenční mikroskopie

Luminiscenční mikroskopie bývá v zahraniční literatuře označována jako Photon Emission Microscopy, zkráceně PEM. Využívá se při analýze integrovaných obvodů v polovodičovém průmyslu.



Obr. 32: Základní sestava měřicího pracoviště metody luminiscenční mikroskopie

Princip buzení fotoemise je stejný jako u elektroluminiscence a probíhá také v temném boxu. Pro analýzu SC je výhodou této měřicí sestavy využití optického mikroskopu a hrotového

přesného nakontaktování, jak celého článku, tak i jeho mikroskopického úlomku. Optický mikroskop Mitutoyo je osazen CCD detektorem a NIR objektivy. Měření probíhá při pokojové teplotě a světelná emise je snímána CCD detektorem se snímačem Hamamatsu S7170. Pracoviště (viz obr. 32) je umístěno v diagnostické laboratoři společnosti ON Semiconductor v Rožnově pod Radhoštěm.

5.5.1 Programové zpracování výstupních snímků luminiscenčních metod

Jako vhodný nástroj pro kvalitativní porovnávání většího množství snímků luminiscence mikroplazmy, měřených za stejných podmínek, je standardně používán algoritmus vytvořený v interaktivním programovém prostředí Matlab, který byl publikován J. Dolenským v roce 2014 [47]. Algoritmus váhuje každou hodnotu pixelu snímku, z čehož je určen stupeň šedé, černé nebo bílé barvy, jenž pak reprezentuje procentuální zastoupení defektů v ploše článku a intenzity elektroluminiscence článku. Citace zdrojového kódu algoritmu dle [47]:

```
clc;
clear all;
close all;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DULEZITE
% Nastaveni poctu obrazku, ktere budou analyzovany v teto kategorii EL
a = 7;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Vysledek = [ ];

for x = 1:a;
[FileName,PathName] = uigetfile('*.jpg','Vyber EL obraz 500x500(*.jpg)'); % Nacteni
nazvu souboru a cesty. a
if isequal(FileName,0)
disp('Uživatel zvolil: "Storno"');
else
A = imread([PathName,FileName]); %Nacteni *.jpg do A.
A = rgb2gray(A); %Prevod z RGB do Gray.
imshow(A)
prah = floor((max(max(A)))/2); %Urceni prahu.
[sizeA1,sizeA2] = size(A); %Rozliseni [radky, sloupce].
PocetPixelu = sizeA1*sizeA2; %Celkovy pocet pixelu.
VadnePixely = 0;
for i = 1:sizeA1;
for j = 1:sizeA2;
if A(i,j)<= prah %Kdyz je hodnota mensi nebo rovna prahu delej...
VadnePixely = VadnePixely + 1;
end
end
end
Intenzita = (VadnePixely/PocetPixelu)*100; %Urceni procenta intenzity
Intenzita = num2str(Intenzita);
IntenzitaRadek = ['Intenzita u: ',FileName,' je ', Intenzita,'%.'];
```

```

[v,delka] = size(IntenzitaRadek);
Vysledek(x,1:delka) = IntenzitaRadek;
end
end

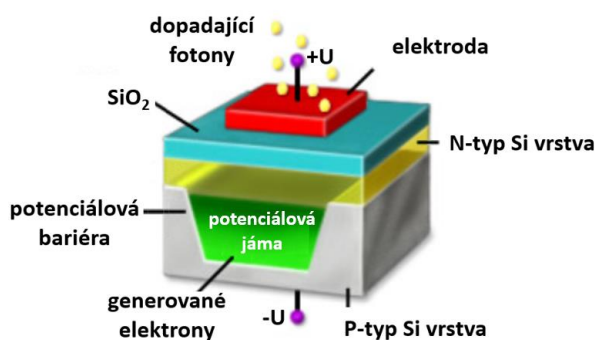
char(Vysledek)

```

5.6 Detektor luminiscenčního záření

Jako detektor odezvy luminiscenčního záření jsou v této práci použity dva typy komerčně vyráběných vysoce citlivých, nízko-šumových CCD kamer. Jak již název napovídá, základním prvkem těchto kamer je CCD (Charge Coupled Device) obrazový senzor, jenž představuje strukturu s nábojově vázanými obvody struktury MOS (viz obr. 33). U této struktury jsou elektrody od epitaxní vrstvy polovodiče odděleny tenkou izolační vrstvou oxidu křemičitého SiO_2 .

Dopadající světlo (fotony) vytváří v polovodiči elektrický náboj, tedy díky principu fotoefektu dojde dopadem fotonů k uvolnění elektronů a vytvoření páru elektron-díra. Elektrony jsou přitahovány ke kladně nabité elektrodě, ovšem použití izolační vrstvy SiO_2 , znemožní odvedení uvolněného náboje kladně nabitou elektrodou. Tyto elektrony pak mohou být zachyceny a uloženy v potenciálových jamách. Každá potenciálová jáma reprezentuje jeden obrazový bod (označován jako pixel), tedy nejmenší element (čtvereček) obrazu. Každý pixel má tři elektrody. Principem třífázového hodinového signálu dochází k postupnému přesouvání náboje z jedné jámy do sousední, a tím k jeho vysouvání na okraj čipu, kde je pomocí převodníku přeměněn na napěťový signál (obrazovou informaci).



Obr. 33: Struktura základního elementu CCD čipu- MOS kapacitor [48]

Mezi nejzákladnějších charakteristiky CCD čipu patří počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru a také velikost pixelu. Pokud jsou pixely vystavené většímu množství světla, logicky naakumulují více elektronů. Můžeme říci, že schopnost akumulace náboje po dlouhou dobu je jedna z výhod ve srovnání s lidským okem. Proto jsou CCD snímače využívány i

k detekci velmi slabých světelných zdrojů, jelikož mohou postupně po delší dobu (doba expozice) nashromáždit dostatek světla i z velmi slabých světelných zdrojů [49], [50].

Významný vliv na výslednou kvalitu obrazu má tzv. temný proud. Bohužel u CCD snímačů elektrony vznikají v pixelech nejen v důsledku dopadajícího světla, ale také náhodně např. v závislosti na okolní teplotě a velikosti pixelu. Tímto způsobem tepelně generovaný náboj označujeme jako temný proud (tepelný šum). Signál je generován i v případě, kdy je čip zcela ve tmě. Obvykle se vyjadřuje v elektronech za sekundu na pixel při definované teplotě (např. $0,8 \text{ e}^-/\text{s}$ na pixel při 0°C) [50].

U prvního typu CCD kamery se jedná o specializovanou chlazenou kameru model G2-3200, jenž můžeme vidět na obr. 34, používající 3,2 MPx snímač OnSemi KAF-3200ME. Efektivní dvoustupňové chlazení s Peltierovými články udržuje čip hluboce zmrazený, aby byl minimalizován tepelný šum (temný proud). Kamera má poměrně vysokou citlivost s maximální kvantovou účinností přes 80% ve viditelné oblasti spektra. Kvantová účinnost v IR oblasti ($\lambda = 1000 \text{ nm}$) je přibližně 7 %, přičemž kvantová účinnost CCD čipu je číslo, které nám říká kolik procent dopadajících fotonů na polovodič je převedeno na elektrický (obrazový) signál.



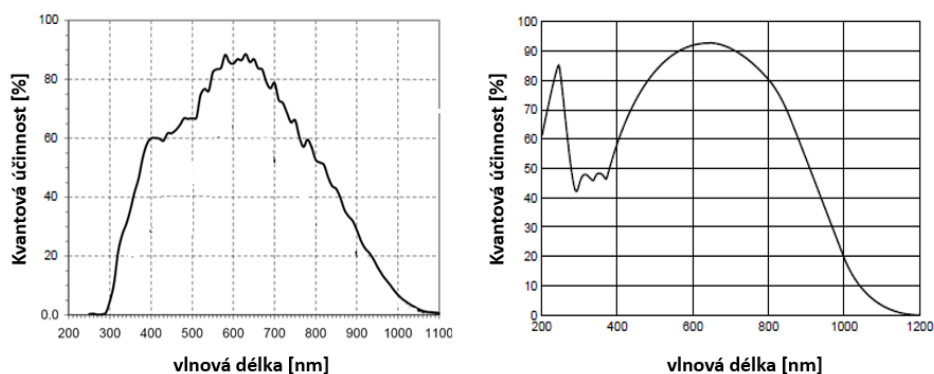
Obr. 34: CCD kamera model G2-3200 (a) s 3,2 MPx snímačem OnSemi KAF-3200ME (b)

U druhého typu CCD kamery se jedná o model C4880-21 s CCD snímačem (S7170) vyráběným firmou Hamamatsu (viz obr. 35). Tato kamera má o něco vyšší maximální kvantovou účinnost, a to přes 90% ve viditelné oblasti spektra.



Obr. 35: CCD kamera model C4880-21 se snímačem Hamamatsu S7170 [49]

Kvantová účinnost v IR oblasti ($\lambda = 1000 \text{ nm}$) je přibližně 20 %. Závislost kvantové účinnosti snímače KAF-3200ME a Hamamatsu S7170 je uvedena na obr. 36 [49], [50].



Obr. 36: QE CCD snímače OnSemi KAF-3200ME (vlevo) a Hamamatsu S7170 (vpravo) [50], [49]

V tab. 1 je uvedeno srovnání obou CCD čipů OnSemiconductor KAF-3200ME a Hamamatsu S7170. V tabulce jsou uvedeny mimo jiné základní charakteristiky, tzn. počet pixelů a jejich velikost.

Tab. 1: CCD KAF-3200ME a Hamamatsu S7170

<i>Specifikace</i>	<i>Onsemi KAF-3200ME</i>	<i>Hamamatsu S7170</i>
Rozlišení	2184 × 1472 pixelů	512 × 512 pixelů
Velikost pixelu	6,8 μm × 6,8 μm	24 × 24 μm
Obrazová plocha	14,9 mm × 10 mm	12,288 × 12,288 mm
Rozsah spektrální odezvy	300 to 1100 nm	200 to 1150 nm
Temný proud	0,8 e-/s/pixel při 0 °C	0,3 e-/s/pixel při 0 °C
Zdvojení tepelného šumu	6°C	6°C
QE při λ =1000nm	7%	20%

Díky velikosti plochy obrazových bodů má Hamamatsu senzor nižší temný proud. Víme, že šum je obrazová vada a její příčina spočívá v uvolnění elektronů jiným způsobem než dopadem fotonu na povrch senzoru. Takto uvolněné elektrony neodpovídají dopadajícímu toku fotonů a způsobí tak obrazovou chybu. Analýza solárních článků pomocí CCD kamery s Hamamatsu senzorem by měla přinést kvalitnější obrazovou informaci.

6 Praktická část

Hlavní část této práce se zaměřuje na nedestruktivní analýzu vyzařovaného infračerveného záření solárních článků v laboratorních podmínkách. V první části byly analyzovány vybrané vzorky mikroskopickou metodou elektroluminiscence. Tato metoda se používá k diagnostice integrovaných obvodů. Nepoužívá se standardně v diagnostice solárních článků. Cílem použití této metody bylo prokázání faktoru zvětšení (mikroskopie) při zobrazení lokální emise v mikroploše článku a jeho přínos pro zpřesnění kvalitativního hodnocení defektů. V druhé části práce bylo inovováno měřicí pracoviště metody elektroluminiscence k využití polarizační analýzy.

Rozšířenou metodou elektroluminiscence v podobě mikroskopické a polarizační luminiscenční metodiky pro charakterizaci defektů byly v praktické části proměřeny monokrystalické a polykrystalické solární články. Základní vstupní informací všech vzorků byly elektrické parametry získané ze solárního simulátoru.

Kromě výše uvedené rozšířené metody elektroluminiscence byly vybrané solární články zkoumány dalšími metodami jako již zmíněná elektrická VA charakteristika, pozorováním mikroplazmy (MP) – někdy také označováno jako metoda EL v závěrném směru, optickou a elektronovou mikroskopií (SEM). Výběrová skupina monokrystalických článků byla navíc inprocesně charakterizována čtyřbodovou metodou pro měření vrstevového odporu emitorové vrstvy.

6.1 Vstupní materiál – analyzované vzorky

Solární články zkoumané v rámci této práce byly vyrobeny firmou Solartec s. r. o. sídlící v Rožnově pod Radhoštěm, v rámci mé spolupráce na výzkumu difúze fosforu pro realizaci emitoru na p-tytovém krystalickém solárním článku (viz publikace vydané v odborných periodikách Elektrevue [26] a ElectroScope [51]). Analyzovány byly monokrystalické i polykrystalické SC, přičemž větší pozornost byla věnována právě polykrystalickým článkům. Polykřemík jako výchozí surovina je levnější a i přes o něco horší elektrické vlastnosti (hranice zrn v poly-Si zvyšují ztráty rekombinací) má významně vyšší výzkumný potenciál pro budoucí uplatnění.

6.2 Monokrystalické solární články

Mono-Si byly vyrobeny z křemíkových desek (substrátu) od firmy Deutsche Solar. Jedná se o křemíkové desky s pseudo-čtvercovou aktivní plochou o rozměrech 5ti palců (tj. 125x125 mm). Průměrná tloušťka vstupního substrátu (celé sady) se pohybovala okolo 263 μm s průměrnou resistivitou 2,9 $\Omega\cdot\text{cm}$.

Mono-Si články byly zpracovány standardním způsobem. Po odleptání pohmožděné vrstvy leptáním v roztoku KOH byla na povrchu monokrystalických desek připravena textura. Vysokoteplotní difúzí pak byl vytvořen nasycený emitor s průměrným vrstevným odporem okolo 50 Ω/sq . Odpor emitoru byl alternativně in-procesně proměřen na čtyřsondě RS35 pro měření vrstevného odporu, která je zobrazena na obr. 37. Čtyřbodová metoda měření vrstevného odporu patří k nejjednodušším způsobům získání této informace



Obr. 37: A - Prometrix RS35 pro měření vrstevného odporu; B – čtyřbodová hlava; C– základna pro wafer

Výsledek vrstevného odporu R_{sh} (z anglického sheet resistance) je dán vztahem (22) :

$$R_{sh} = kp \frac{U}{I} , \quad (22)$$

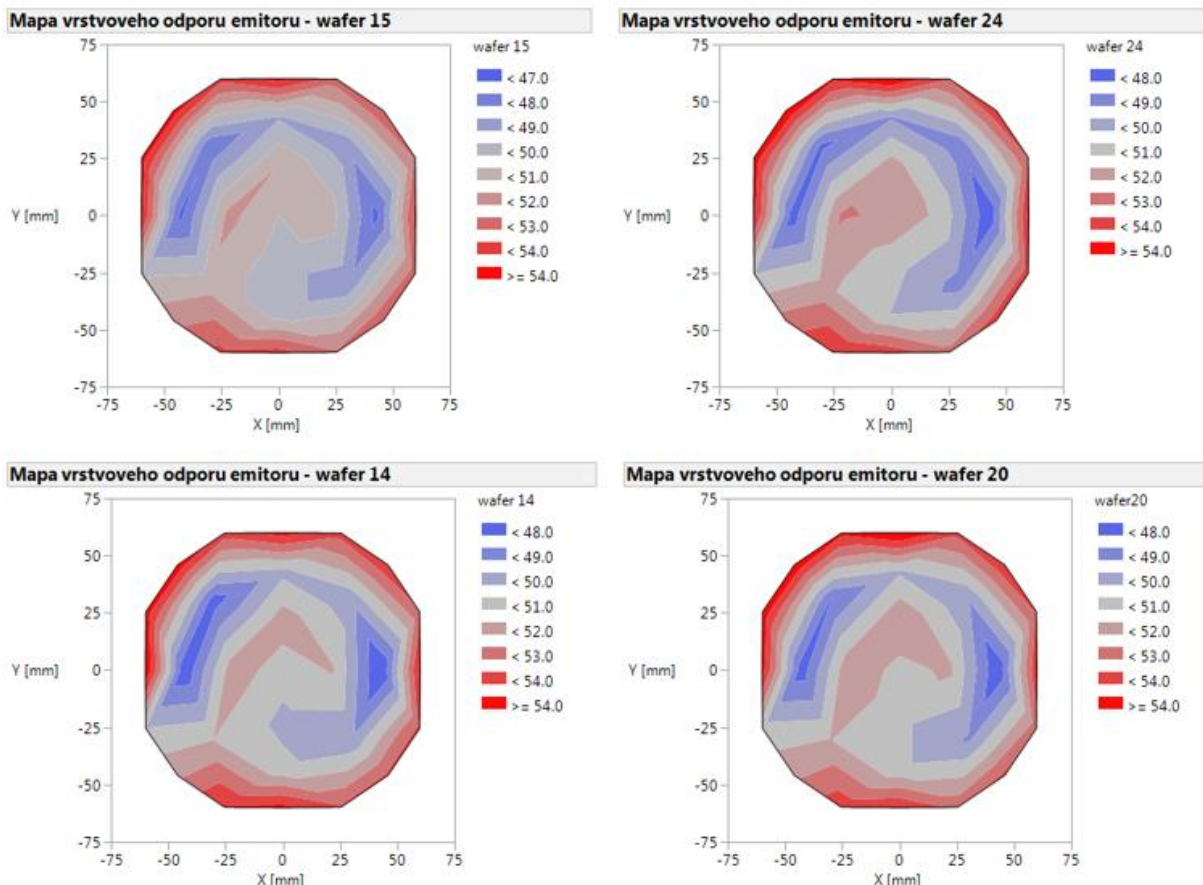
kde U je měřené napětí na čtyřbodové hlavě (vnitřních hrotů), I je proud dodaný přesným proudovým zdrojem do vzorku přes vnější (krajní) hroty a kp je korekční parametr. Korekční parametr je dán vzdáleností čtyř hrotů měřící hlavy (snímek B) a rozměrem vzorku. Pro měření dopovaných vrstev v křemíkových substrátech se používá hodnota koeficientu 4,53 [52].

Tab. 2: Vrstvový odpor vybraných mono-Si článků

<i>Sheet Resistance [Ω/sq]</i>	<i>wafer 15</i>	<i>wafer 24</i>	<i>wafer 14</i>	<i>wafer 20</i>
Mean	51.3	51.8	51.7	51.9
Min	46.7	47.3	46.9	47.2
Max	54.7	55.1	55.2	55.2
Range	7.9	7.9	8.2	8.0
Standard deviation	2.4	2.4	2.4	2.3

Měřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 2. Směrodatná odchylka, čili rozptyl hodnot od průměru v rámci plochy desky vychází srovnatelně na všech deskách přibližně 4,3%. Rozptyl mezi vzorky činí 1.1%, což odpovídá standardní výrobě. Mapy vrstevných odporů emitorové

difúze u vybraných čtyř reprezentativních vzorků můžeme vidět na obr. 38. U předkládaných vzorků nebyla pozorována taková míra nehomogenity, jenž by se projevila jako defektní plocha s nižší intenzitou zářivé rekombinace ve výsledcích metody elektroluminiscence.



Obr. 38: Mapy vrstevných odporů emitoru vzorků uvedených v tab. 3 (vyhodnoceno v programu JMP)

Deponovaná pasivační antireflexní vrstva přední strany byla vytvořena metodou PECVD. Pro vytvoření metalizace přední (aktivní) strany měřených SC je použita maska, která obsahuje dva busbary (pro nakontaktování spojovacích pásků jednotlivých SC ve fotovoltaickém modulu) a vodivé prsty pro odvedení proudu z aktivní plochy solárního článku. Pro metalizaci zadní strany jsou použity dvě masky. První maska obsahuje dva busbary (pro odvedení napětí z celoplošného kontaktu) a druhá zabezpečuje pokrytí zbytkové plochy hliníkem (pro zlepšení pasivačních vlastností a zvýšení zisku napětí). V posledním kroku výroby solárních článků se izolují hrany pomocí laseru o vlnové délce 532 nm.

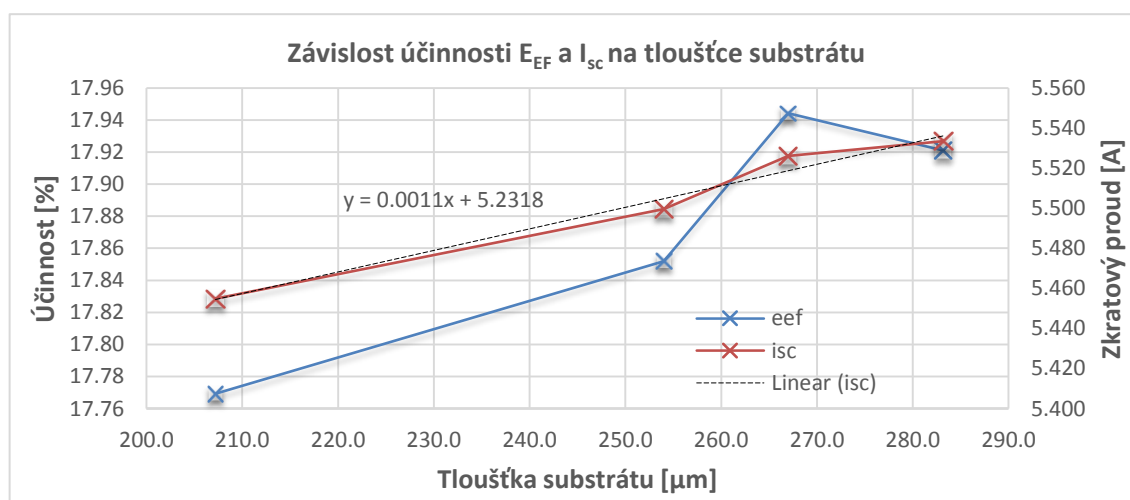
6.2.1 Elektrické vlastnosti mono-Si článků

U všech zpracovaných solárních článků byla měřena VA charakteristika na solárním simulátoru. Měření na solárním simulátoru probíhalo dle normy ČSN EN 60904. Intenzita záření při měření byla 1000 W/m^2 , spektrum záření dle AM1.5 a teplota článků při měření na kontaktním stolku 25°C .

Tab. 3: VA charakteristiky čtyř vybraných reprezentativních vzorků mono-Si

wfr.	$I_{450} [\text{A}]$	$I_{SC} [\text{A}]$	$U_{OC} [\text{V}]$	$I_m [\text{A}]$	$U_m [\text{V}]$	$P_m [\text{W}]$	$FF [-]$	$E_{EF} [\%]$	$R_{SO} [\Omega]$	$R_{SH} [\Omega]$	$I_{EL} [\%]$
15	5.290	5.455	0.615	5.235	0.501	2.624	78.26	17.77	0.009	36.8	82,95
24	5.343	5.500	0.615	5.295	0.501	2.651	78.37	17.85	0.009	68.8	82,67
14	5.369	5.526	0.615	5.322	0.501	2.665	78.40	17.94	0.009	89.9	83.5
20	5.366	5.533	0.616	5.320	0.500	2.661	78.10	17.92	0.009	74.5	83.55

Zajímavostí také bylo, že u všech měřených vzorků byla známá vstupní tloušťka substrátu. Ta měla větší variabilitu než standardní produkce ($\pm 20 \mu\text{m}$). Z následného grafického vyjádření měřených reprezentativních vzorků (viz tab. 3) vyplývá, že velikost tloušťky křemíkové desky má v tomto případě (ve variabilitě uvedené na ose x) vliv na účinnost solárního článku. Závislost účinnosti E_{EF} a I_{SC} na tloušťce substrátu je vynesena v grafu na obr. 39 níže.



Obr. 39: Graf závislosti účinnosti E_{EF} a I_{SC} na tloušťce substrátu

Hodnoty proudu na krátko se snižují s tloušťkou substrátu o $0,11 \text{ mA}$ na $1 \mu\text{m}$ tloušťky křemíkové desky. Mezi nejznámější publikace charakterizující tento jev patří [53], kde byl popsán jev snižujícího se I_{SC} v závislosti na snižující se tloušťce substrátu.

Pro struktury solárních článků s vyšší difúzní délkou minoritních nosičů náboje je předpoklad snižujícího se I_{SC} v kombinaci s kratší optickou dráhou (tloušťkou článku) dopadajícího slunečního záření. Fyzikálním vysvětlením je vysoká vnitřní odrazivost zadní

metalizace solárního článku při průchodu slunečního záření článkem v kombinaci s nízkou efektivitou difúzní délky minoritních nosičů náboje v substrátu.

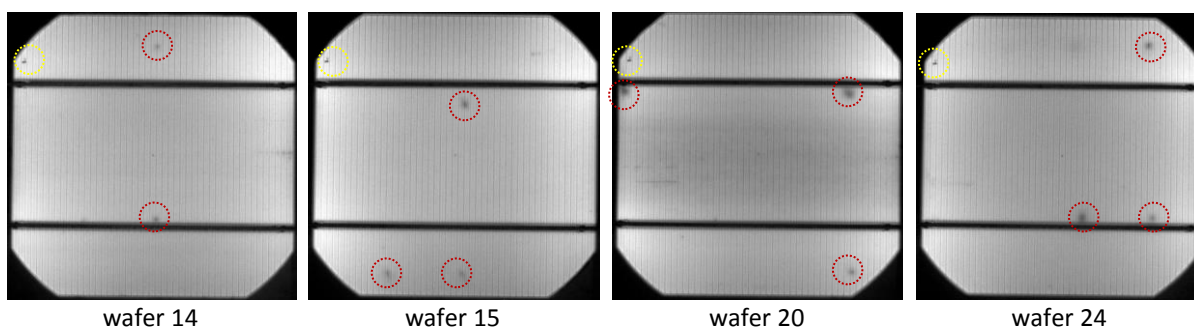
Graf závislost účinnosti E_{EF} na proudu na krátko I_{sc} je zobrazen na obr. 40.



Obr. 40: Graf závislosti účinnosti E_{EF} na zkratovém proudu I_{sc}

6.2.2 Měření mono-Si článků standardní metodou elektroluminiscence

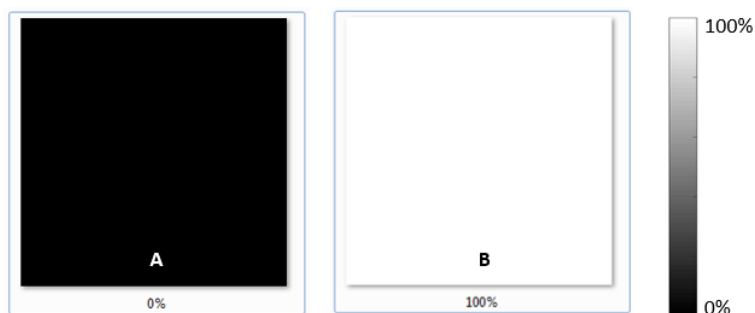
Z hlediska luminiscenční diagnostiky byly výše měřené články analyzovány pomocí metody elektroluminiscence. Výsledné snímky potvrdily data z VA charakteristik, články jsou bez rozsáhlejších defektů, čemuž i odpovídá měřená účinnost. Všechny vzorky z tab. 3 vykazovaly pouze lokální bodové nečistoty (prachové částice, označeny červeně) a opakující se bodový defekt (označen žlutě). Zde se nejedná o mechanické poškození vzniklé v procesu vlivem shodné manipulace se všemi vzorky, jak by se mohlo na první pohled zdát. Opakující se tmavý bod vytváří metalovou vrstvou nanesená písmena S_{TC} (označení článků vyrobených ve firmě Solartec). Kromě prachových částic byly díky metodě PEM objeveny náhodné mikrorýhy, jejichž detail je uveden v kapitole 6.5.



Obr. 41: Electroluminiscence mono-Si článků za podmínek $I=1,9A$ a $U=1,1V$

V tab. 3 je v posledním sloupci uvedena hodnota intenzity záření celé plochy článku. Pro výpočet této hodnoty byl upraven výpočtový algoritmus popsáný v kapitole 5.5.1 v programu

Matlab. Původní algoritmus považoval za defektní oblast (*vadný pixel*) bílou barvu, což je správně pro metodu pozorování mikroplazmy. Ve výsledných snímcích z metody elektroluminiscence reprezentuje defektní oblast tmavší plocha, naopak místa s největší proudovou hustotou jsou reprezentována světlými oblastmi.



Obr. 42: Testovací snímky pro algoritmus výpočtu intenzity EL v programu Matlab (A = 0%, B = 100%)

Upravený původní algoritmus z kapitoly 5.5.1 pro výpočet intenzity EL u monokrystalických článků (uvedeny v tab. 3), doplněn o kalibrační snímky z obr. 42, je uveden v textu níže. Kalibrační snímky nabývají hodnot $I = 0\%$ (černý) a $I = 100\%$ (bílý).

```

clc;
clear all;
close all;
% Nastaveni poctu obrazku, ktere budou analyzovany v teto kategorii EL
a = 6;
Vysledek = [ ];
for x = 1:a;
    [FileName,PathName] = uigetfile('*.jpg','Vyber EL obraz 600x600(*.jpg)'); % Nacteni
    nazvu souboru a cesty
    if isequal(FileName,0)
        disp('Uživatel zvolil: "Storno"');
    else
        A = imread([PathName,FileName]); %Nacteni *.jpg do A.
        A = rgb2gray(A); %Prevod z RGB do Gray.
        imshow(A)
        prah = floor((max(max(A)))/2); %Urceni prahu.
        [sizeA1,sizeA2] = size(A); %Rozliseni [radky, sloupce].
        PocetPixelu = sizeA1*sizeA2; %Celkovy pocet pixelu.
        VadnePixely = 0;
        for i = 1:sizeA1;
            for j = 1:sizeA2;
                if A(i,j)<= prah %Kdyz je hodnota mensi nebo rovna prahu
                    delej...
                    VadnePixely = VadnePixely + 1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

Intenzita = (1-(VadnePixely/PocetPixelu))*100; %Urceni procenta intenzity
Intenzita = num2str(Intenzita);
IntenzitaRadek = ['Intenzita EL u: "',FileName,'" je ', Intenzita,'%'];
[v,delka] = size(IntenzitaRadek);
Vysledek(x,1:delka) = IntenzitaRadek;
end
end
char(Vysledek)

```

Měřené články jsou bez rozsáhlejších defektů, což odpovídá intenzitě elektroluminiscence, která je pro všechny snímky přibližně stejná okolo 83%. Textový výstup výpočtu výše uvedeného algoritmu, jenž je doplněn o kalibrační (ověřovací) snímky z obr. 42, je uveden níže.

```

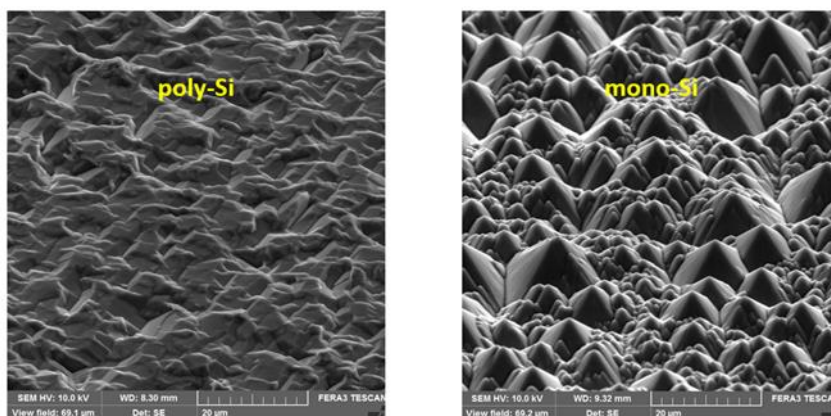
'Intenzita EL u: "0%.jpg" je 0%.'
'Intenzita EL u: "MonoSi_wfr15.jpg" je 82.957%.'
'Intenzita EL u: "MonoSi_wfr24.jpg" je 82.6766%.'
'Intenzita EL u: "MonoSi_wfr14.jpg" je 83.5012%.'
'Intenzita EL u: "MonoSi_wfr20.jpg" je 83.5576%.'
'Intenzita EL u: "100%.jpg" je 100%.'

```

Většina monokrystalických analyzovaných článků měla velmi nízkou variabilitu účinnosti (respektive defektivitu), tak jako reprezentativní skupina uvedená v tab. 3. Z pohledu makroskopické diagnostiky defektů metodou EL, jsou tyto drobné niance nerozlišitelné.

6.3 Polykrystalické solární články

Poly-Si články byly rovněž vyrobeny ze substrátu od firmy Deutsche Solar. Křemíkové desky (wafers) o rozměrech 5ti palců s průměrnou tloušťkou celé sady okolo $200 \pm 20 \mu\text{m}$. Po oleptání zhmožděné vrstvy v roztoku KOH u poly-Si nevzniknou na rozdíl od mono-Si na povrchu článků pravidelné „piramidky“, jak je možno vidět z analýzy článků v této práci na obr. 43 ze skenovacího elektronového mikroskopu. Povrch poly-Si SC je tedy bez textury.



Obr. 43: SEM analýza povrchu mono a poly Si solárního článku

Další postup výroby se shodoval s výše popsáním u mono-Si článků. Procesem vysokoteplotní difúze byl vytvořen nasycený emitor s vrstevným odporem okolo 50 Ohm/sq . Deponovaná pasivační antireflexní vrstva SiNx přední strany byla vytvořena metodou PECVD

o tloušťce 80 nm. Následovalo vytvoření vodivé metalizace (dle výše uvedeného postupu) a izolace hran laserem.

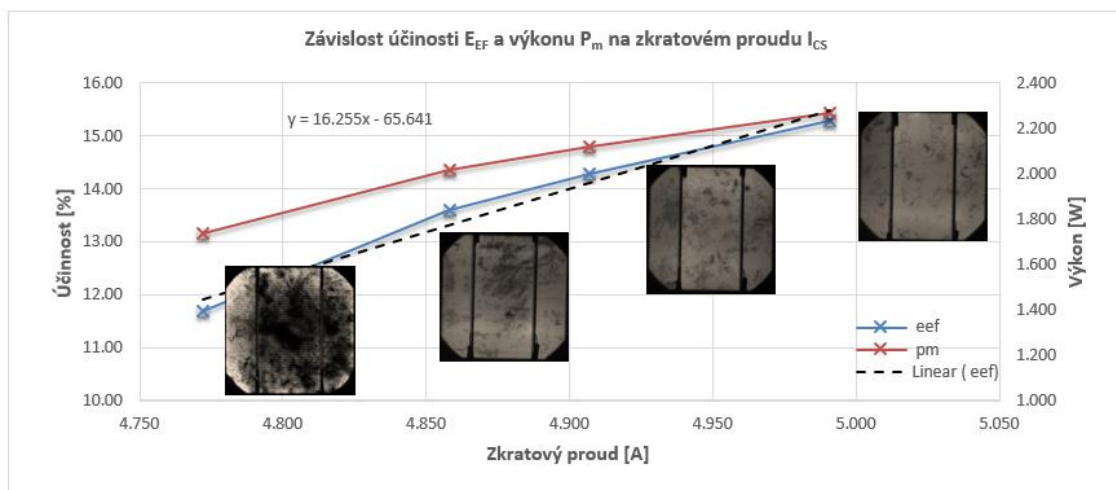
6.3.1 Elektrické vlastnosti poly-Si článků

Celá sada zpracovaných solárních článků byla opět proměřena solárním simulátorem. Měření VA charakteristik probíhalo při intenzitě záření 1000 W/m^2 , se spektrem záření AM1.5 a teplotě měření na kontaktním stolku 25°C . Z naměřených hodnot vyplývá, že sada poly-Si článků má daleko větší výkonovou variabilitu v rámci sady (vyšší variabilita „wafer to wafer“).

Tab. 4: VA charakteristiky čtyř vybraných reprezentativních vzorků poly-Si

wfr	$I_{450} [\text{A}]$	$I_{SC} [\text{A}]$	$U_{OC} [\text{V}]$	$I_m [\text{A}]$	$U_m [\text{V}]$	$P_m [\text{W}]$	$FF [-]$	$E_{EF} [\%]$	$R_{SO} [\Omega]$	$R_{SH} [\Omega]$	$I_{EL} [\%]$
11	3.293	4.772	0.598	4.033	0.431	1.737	60.87	11.70	0.022	21.0	17.2
12	4.113	4.858	0.607	4.297	0.470	2.020	68.57	13.61	0.014	27.1	37.43
4	4.329	4.907	0.610	4.486	0.473	2.121	70.84	14.28	0.014	43.1	46.26
8	4.638	4.991	0.612	4.660	0.487	2.269	75.18	15.28	0.012	67.8	51.75

Graf závislosti účinnosti E_{EF} a výkonu P_m na zkratovém proudu I_{CS} můžeme shlédnout na obr. 44. Tak jako u mono-Si článků, můžeme konstatovat, že zkratový proud je určujícím parametrem účinnosti těchto článků a má lineární závislost. V grafu jsou také k příslušným bodům doplněny originální snímky z elektroluminiscenčního měření, které slouží k výpočtu I_{EL} z plochy článku.



Obr. 44: Graf závislosti účinnosti (E_{EF}) a výkonu (P_m) na zkratovém proudu (I_{SC})

6.3.2 Měření poly-Si článků standardní metodou elektroluminiscence

Z hlediska luminiscenční diagnostiky byly uvedené vzorky článků analyzovány nejprve pomocí standardní metody EL a MP. Na rozdíl od monokrystalických článků uvedených

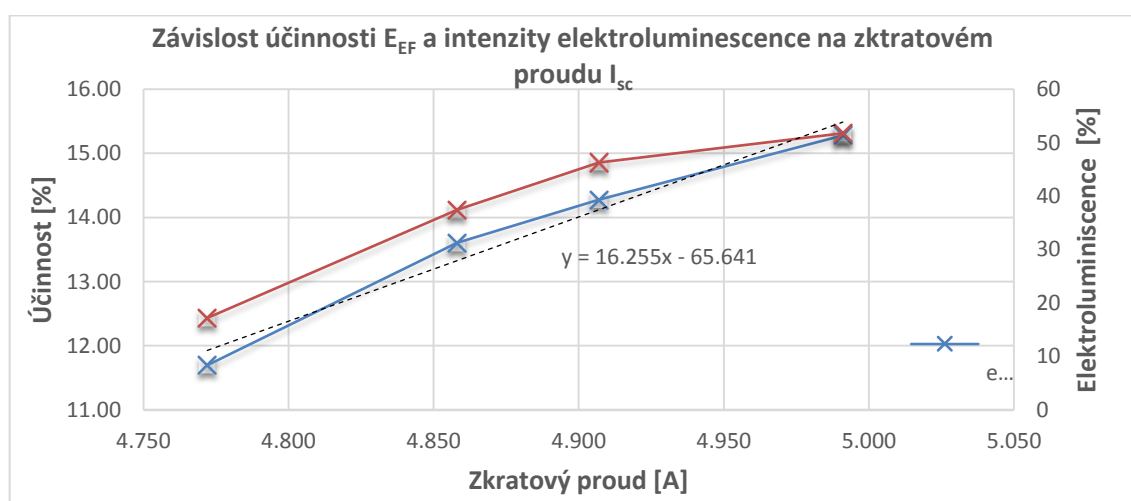
v kapitole 6.2, jsou polykrystalické velmi nehomogenní z pohledu celkového rozložení proudové hustoty v článku při měření metodou EL. Měřené články obsahují i rozsáhlejší plochy defektů, což odpovídá celkové intenzitě elektroluminiscence uvedené v posledním sloupci tab. 4. U předloženého vzorku článků koreluje lineární závislost intenzity EL (I_{EL}) na zkratovém proudu, respektive účinnosti na měřeném výkonu SC. Procentuální textový výstup výpočtu I_{EL} v programu matlab, jehož upravený algoritmus je uveden v předchozí kapitole, se nachází v textu níže. Celková I_{EL} plochy článku vyjádřená v procentech činí:

'Intenzita u: "PolySi_wfr11.jpg" je 17.2093%.'

'Intenzita u: "PolySi_wfr12.jpg" je 37.4337%.'

'Intenzita u: "PolySi_wfr4.jpg" je 46.2686%.'

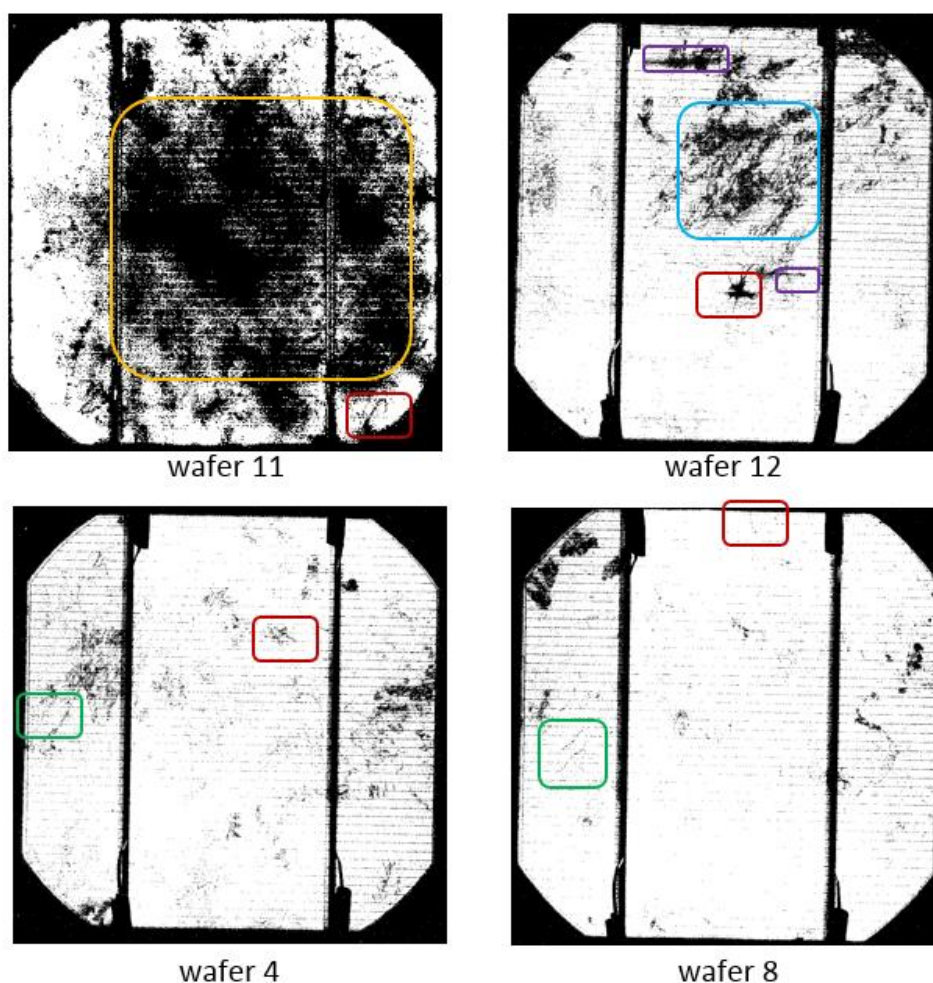
'Intenzita u: "PolySi_wfr8.jpg" je 51.7548%.'



Obr. 45: Graf závislosti účinnosti (E_{EF}) a Intenzity EL (I_{EL}) na zkratovém proudu (I_{SC})

V grafu závislosti účinnosti a intenzity EL na zkratovém proudu uvedeném na obr. 45 můžeme nalézt vynesení vztah procentuální defektivity plochy článků a zkratového proudu, jenž odpovídá teoretickému předpokladu. Články s vyšším procentuálním zastoupením bezdefektní plochy, tedy plochy s vyšší proudovou hustotou, mají vyšší účinnost. Upravené elektroluminiscenční snímky do binární (černobílé) podoby jsou praktické zvláště u poly-Si článků, kdy zdůrazní defektní oblasti s mikroprasklinami, hranicemi zrn, škrábanci a jinými defekty. Binární snímky jsou vytvořeny v programu Matlab funkcí `im2bw` (funkce zadána ve tvaru: *obrázek EL, prahová úroveň*). Jedná se o funkci, která obraz ve stupních šedi převede do binární podoby, kdy se uplatňuje prahová úroveň (hodnota mezi [0,1]). Jednoduše lze říci, že touto funkcí získáme informaci zda daný pixel patří do defektní oblasti nebo ne. Nula vyjadřuje, že daný pixel představuje defekt a jednička naopak. Na základě předchozích měření, byla jako ideální hodnota prahové úrovně zvolena hodnota 0,25. Funkce je tedy zapsána např. ve tvaru `im2bw (wafer_4,0.25)`.

Binární interpretace výsledků elektroluminiscence pro vzorky z tab. 4 je uvedena v obr. 46. Vzorky byly měřeny za podmínek $I = 1,9 \text{ A}$ a $U = 1,2 \text{ V}$. Teplota měření odpovídala pokojovým podmínkám ($23 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Z výsledků bylo možno definovat několik typů defektů, jejichž příklady jsou barevně vyznačeny ve snímcích. Konkrétně se jednalo o typy defektů jako jsou mikropraskliny (červeně) nebo pravděpodobná nehomogenita difúzní vrstvy (žlutě). Dislokace (modře), jenž se při standardní EL (tzn. detekce pomocí CCD detektoru) nedají přesně rozlišit a splývají s hranicemi zrn ve větší tmavší defektní plochy. Dále pak jednoznačně rozlišitelné hranice zrn v oblastech vyšší proudové hustoty (zeleně) a vadnou metalizaci (fialově).



Obr. 46: Binární interpretace výsledků metody EL pro vzorky z tab. 3 ($I = 1,9\text{A}$; $U = 1,2\text{V}$)

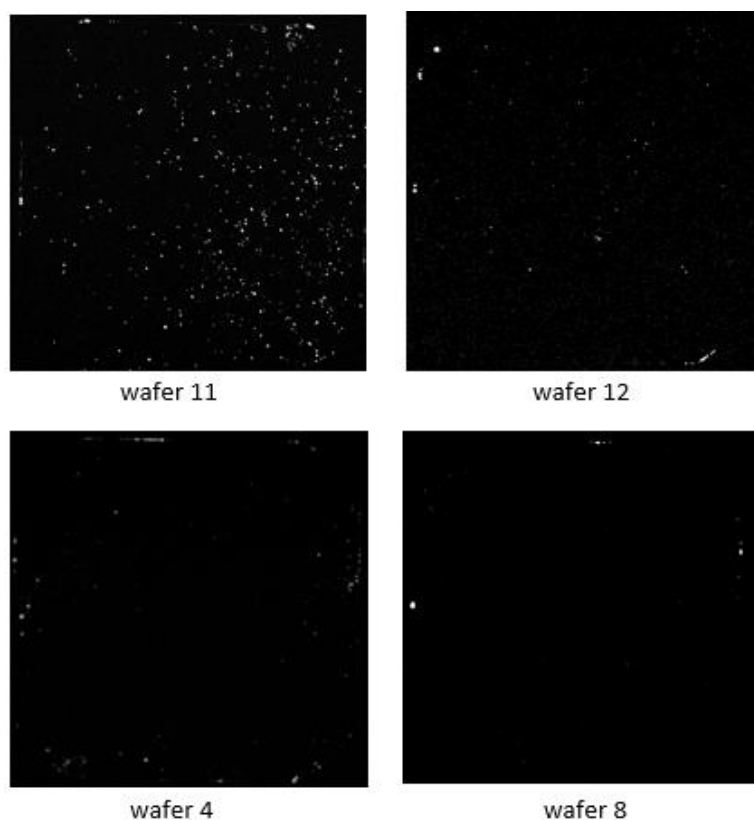
Je důležité zmínit, že pro grafické zobrazení dat při měření metodou EL hraje teplota měření významnou roli. Z vědeckých publikací (jako např. [54]) je známo, že existuje viditelná korelace teploty měření a intenzity elektroluminiscence I_{EL} . Je to dáno tím, že energie do přechodu PN je dodána ve formě tepla a pro generaci záření je tak potřeba nižší napětí. Za podmínky zachování stejného proudu pak získáváme s vyšší teplotou vyšší intenzitu EL.

V rámci našeho výzkumu však teplota měření nebyla úmyslně měněna a kontrola stálých podmínek kontaktního pole solárního článku byla zajištěna pomocí ECT (viz obr. 47) měřáku vlastní výroby. Ten byl vyroben při mé první inovaci měřicího pracoviště metody EL v rámci mé diplomové práce [55]. Disponuje třemi teplotními čidly s výhodou možnosti měření při velmi nízkých teplotách.



Obr. 47: ECT pro kontrolu teplotních podmínek při měření EL

Ve výše uvedeném výčtu defektů chybí různými způsoby zhmožděné hrany solárního článku, které vznikají při a za posledním krokem výroby, jímž je izolace hran broušením nebo laserem. Ideální pro vizualizaci těchto vad je metoda MP. Výsledky měření metodou MP pro vzorky z tab. 4 můžeme nalézt na obr. 48 níže.

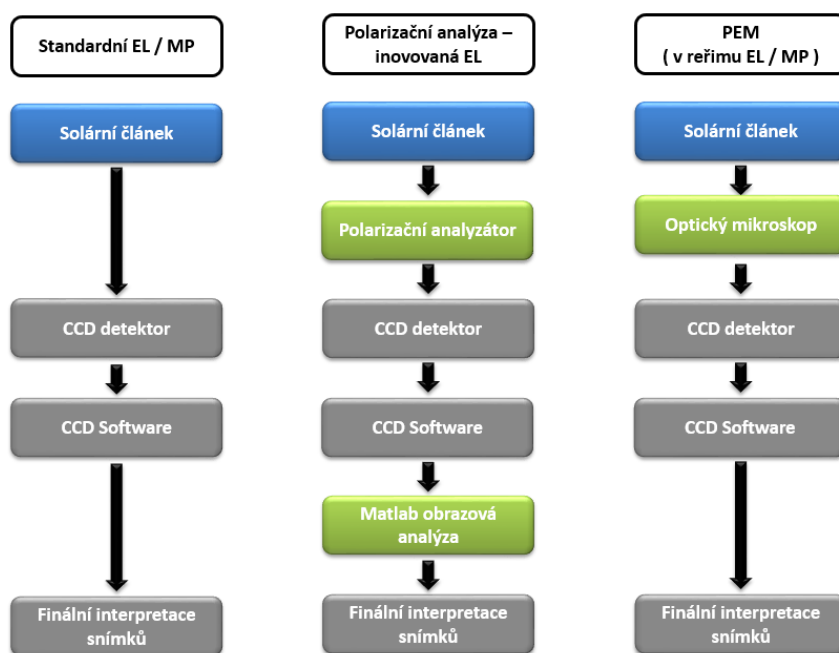


Obr. 48: Výsledky měření metodou MP pro vzorky z tab. 4 ($I = 0,35\text{A}$; $U = 13,1\text{V}$)

Při závěrném napětí 13,1V byl jasně pozorován na výše uvedených snímcích vznik mikroplazmy v oblastech s narušeným PN přechodem (bílé body).

6.4 Modifikované metody elektroluminiscence

Na začátku praktické části byl vstupní materiál pro charakterizaci popsán z hlediska elektrických dat. Tato data byla srovnána s makropohledem elektroluminiscenční metody. V dalším průběhu praktické části budou představeny dvě modifikace standardní metody elektroluminiscence. Na obr. 49 je schématicky zobrazen tok luminiscenční informace pro jednotlivé úpravy standardní metody elektroluminiscence.



Obr. 49: Modifikované metody standardní elektroluminiscence

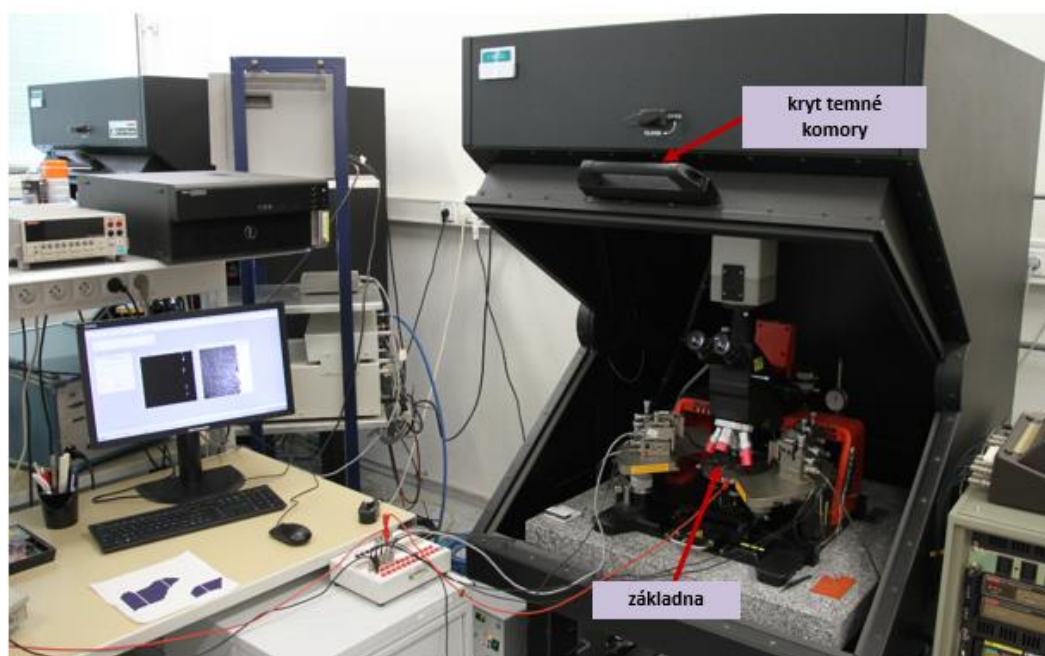
6.5 Photon Emission Microscopy - PEM

Luminiscenční mikroskopie se používá v polovodičovém průmyslu k diagnostice integrovaných obvodů v rámci takzvané FA analýzy (Failure analysis). FA analýza je obecně řečeno proces sběru a analýzy dat k určení příčiny selhání integrovaného obvodu, často s cílem stanovení nápravných opatření. FA je důležitá disciplína v mnoha odvětvích zpracovatelského průmyslu, tedy nejen v polovodičovém a elektronickém průmyslu, kde je důležitým nástrojem pro vývoj nových výrobků a pro zlepšení stávajících produktů. FA využívá pro vyšetření příčiny nebo příčin selhání široké škály metod, zejména mikroskopie, spektroskopie a fotoemise. Tyto metody se řadí mezi nedestruktivní testování (NDT).

V úvodní části této práce je na obr. 32 je zobrazeno schéma pracoviště luminiscenční mikroskopie, jenž bývá označováno jako metoda Photon Emission Microscopy, zkráceně PEM. Metoda se nepoužívá standardně k diagnostice solárních článků. Metoda je optimalizována pro maximální průchod fotonů do detektoru. Cílem použití této metody bylo prokázání faktoru zvětšení (mikroskopie) při zobrazení lokální emise v mikroploše článku a jeho přínos pro zpřesnění kvalitativního hodnocení defektů.

6.5.1 Pracoviště metody PEM

Metoda PEM může být použita u solárního článku zapojeného jak v propustném (EL) tak i v závěrném (MP) směru. V rámci reálné podoby měřicího pracoviště, jenž můžeme vidět na obr. 50, si můžeme všimnout základny pro umístění měřeného vzorku (základna není uvedena na zjednodušeném obr. 32), jenž disponuje vakuovým systémem pro stabilizaci měřeného vzorku.



Obr. 50: PEM měřicí pracoviště

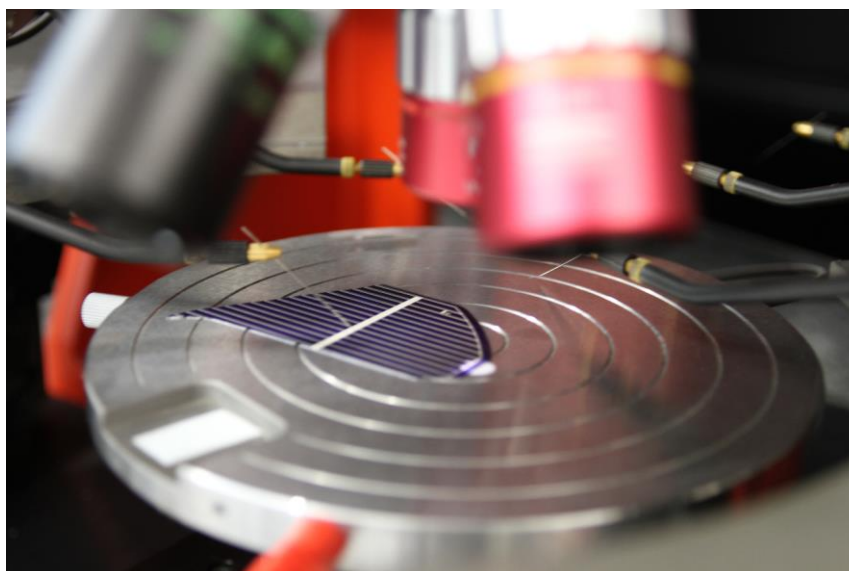
Tak jako měření standardní metodou EL a MP probíhá měření v temné komoře. Přístup do komory je realizován velmi prakticky pomocí otvíratelného krytu. Světelná emise je snímána CCD detektorem se snímačem Hamamatsu S7170, jenž je osazen na optickém mikroskopu Mitutoyo. CCD kamera C4880-21 s uvedeným detektorem S7170 (viz obr. 35) je detailně popsána v kapitole 5.6, popisující detektory emisního záření. Důležité je zdůraznit, že kvantová účinnost v IR oblasti ($\lambda = 1000$ nm) je přibližně 20 %, což je téměř dvojnásobek než u snímače KAF-3200ME používaného u pracoviště standardní EL a MP na VUT v Brně. Rozdíly obou detektorů emise záření jsou přehledně uvedeny v tab. 1.

V průběhu měření jednotlivých vzorků byly při metodách EL a MP různě nastavovány hodnoty proudu a napětí. Pro měření vzorků metodou luminiscenční mikroskopie se jeví optimální nastavení v propustném (EL) a závěrném (MP) dle tab. 5.

Tab. 5: VA nastavení pro měření vzorky metodou PEM v režimu EL a MP

<i>Metoda</i>	<i>Proud [A]</i>	<i>Napětí [V]</i>
EL	2	1.3
MP	0.37	13

Výhodou (v makroskopickém měřítku zároveň nevýhodou) měřicí sestavy, využívající optického mikroskopu, je přesné nakontaktování pomocí hrotových pozicionérů. Přesnost nakontaktování je výhodou zvláště při měření mikroskopických úlomků.



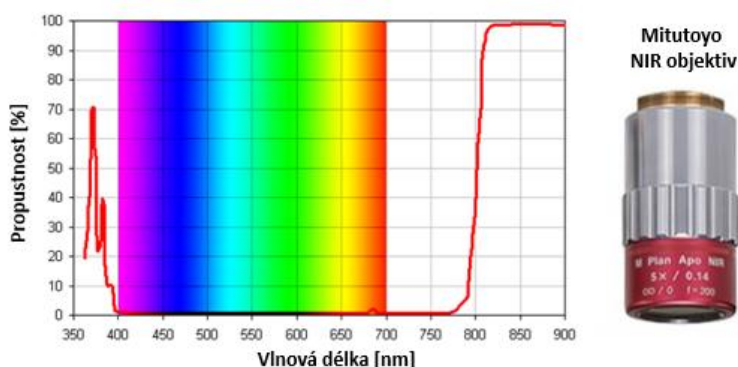
Obr. 51: Úlomek solárního článku (wfr 14, viz tab. 3) nakontaktován na základně pracoviště PEM

V kapitole 5.6, popisující detektory luminiscenčního záření, je zobrazen rozdíl v kvantové účinnosti CCD snímačů KAF-3200ME a Hamamatsu S7170 (viz obr. 36). CCD kamera C4880 s Hamamatsu S7170 detektorem, jenž je připojen na optický mikroskop Mitutoyo, dosahuje vyšší citlivosti zobrazení snímků se zářením v IR oblasti.

6.5.2 NIR objektivy pro metodu PEM

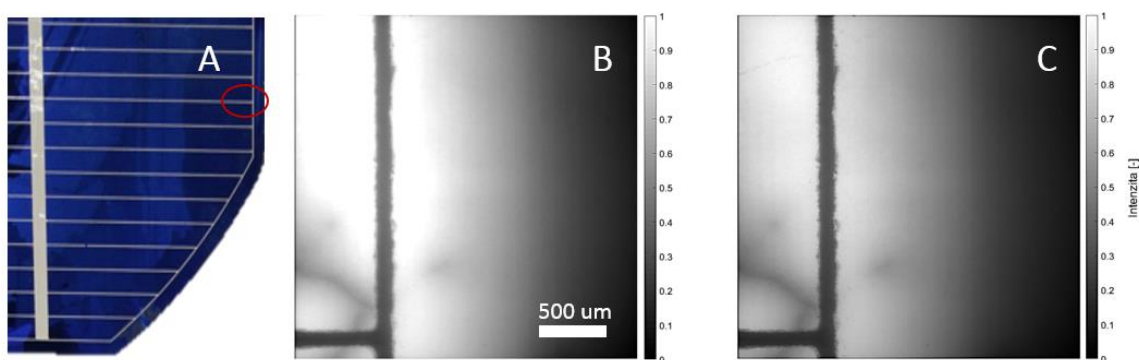
Pro ještě vyšší optimalizaci systému byly místo standardně používaných objektivů použity v této práci NIR objektivy, jenž by měly zvýšit kvalitu zobrazení IR snímků díky filtraci viditelné složky. Objektiv má v optické soustavě mikroskopu hlavní funkci, je to prvek určující kvalitu obrazu. Má malou ohniskovou vzdálenost a čím větší zvětšení, tím menší ohnisková

vzdálenost. Dnes se optická mikroskopie dostala ke svému limitu zvětšení, jenž je dán vlnovou délkou světla. Na obrázku obr. 52 je zobrazen nově použitý NIR objektiv (5x zoom) značky Mitutoyo.



Obr. 52: Mitutoyo NIR objektiv a jeho spektrální propustnost

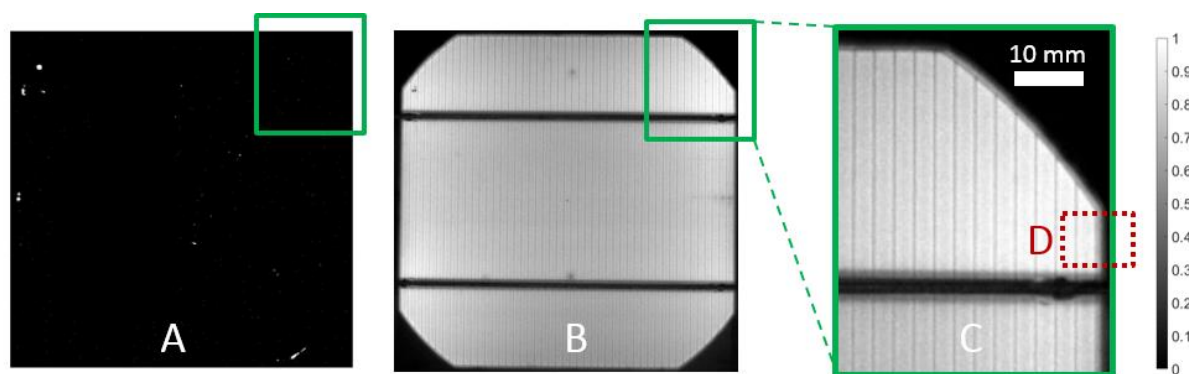
Z obr. 53, kde je zobrazena elektroluminiscence lokální mikrooblasti poly-si článku (wfr 11, viz tab. 4), je patrný vliv měření elektroluminiscence s klasickým objektivem a s novými NIR, při stejném optimálním nastavení proudu (2A) a napětí (1,3V).



Obr. 53: EL poly-si (wfr 11, viz tab. 4) při $I = 2A$ a $U = 1,3V$. Snímek A – optická lokalizace oblasti. B - standardní objektiv a C - NIR objektiv.

6.5.3 PEM analýza monokrystalických solárních článků

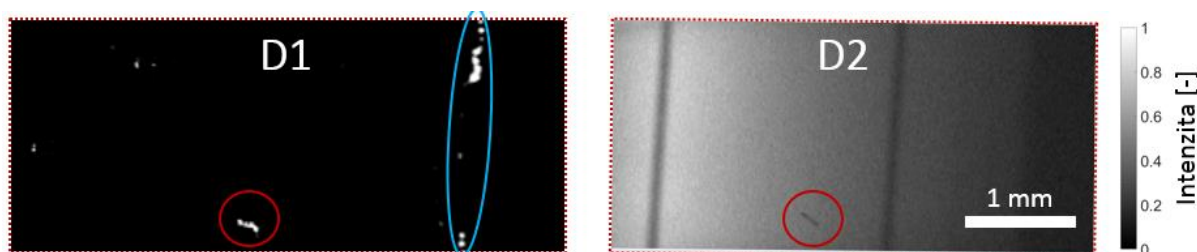
V kapitole 6.2 byly zobrazeny snímky základní metody elektroluminiscence (na obr. 41). Jedná se tedy o makroskopický pohled, z něž jsou definovatelné na daných SC pouze defekty prachových částic. Při detailním zkoumání článku č.14 (obr. 41) metodou PEM, byly objeveny mikrorýhy, tedy místa s odhaleným PN přechodem v přibližné délce okolo 100 μm (viz obr. 55).



Obr. 54: Metoda MP (snímek A) a EL (snímky B a C) pro mono-Si (wfr 14, viz tab. 3). Oblast D vyznačena pro analýzu PEM.

Z obr. 54 je zřejmé, že ani při standardní metodě MP (za podmínek $U = 13 \text{ V}$ a $I = 0,37 \text{ A}$) a ani při EL (za podmínek $I = 2 \text{ A}$ a $U = 1,3 \text{ V}$) nebyla v zeleně vyznačené ploše článku detekována defektní oblast. Zeleně vyznačená oblast se z makroskopického hlediska (obr. 54, snímek B) jeví pro metodu EL jako oblast s konstantní proudovou hustotou. Z pohledu MP nebyla v této ploše generována žádná mikroplazma. (obr. 54, snímek A)

Při použití metody PEM v režimu EL nebo MP a zvětšením objektivu 5x, byla nalezena v červeně vyznačené (obr. 54, oblast D) malé ploše mikrorýha o délce srovnatelné s šířkou metalizace tenkého kontaktu („prstu“), tzn. přibližně 0,1 mm. Tento defekt, který můžeme vidět na obr. 55, označen červeným kroužkem, nebyl lokalizován standardní makroskopickou metodou EL a MP.

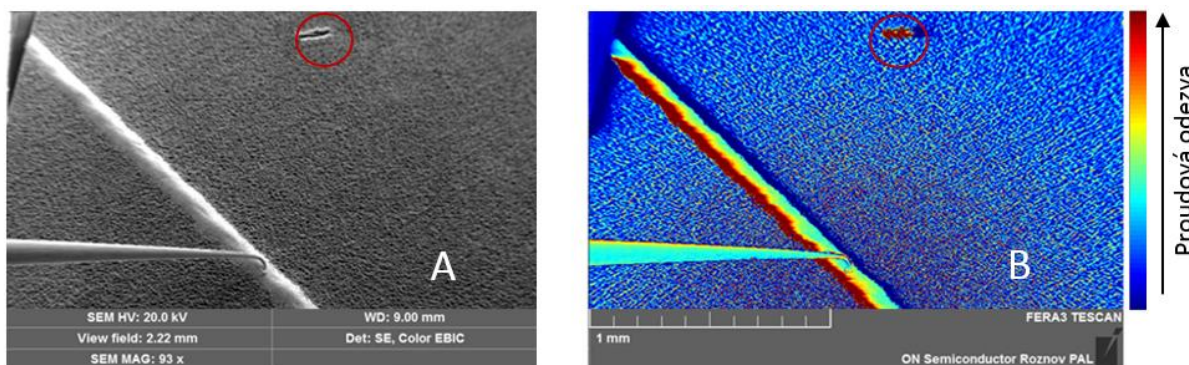


Obr. 55: Metoda PEM v režimu MP (snímek D1) a EL (snímek D2)

Na tomtéž obrázku (obr. 55) u snímku D1 si můžeme dále všimnout, že na rozdíl od makroskopické analýzy, se při mikro-analýze detekovala mikroplazma na hraně článku. Luminiscence mikroplazmy na hraně solárního článku je v uvedeném obrázku vyznačena modrou oblastí. Zhmožděná hrana solárního článku vytváří zkrat PN přechodu. V této mikro-oblasti zhmožděné hrany docházelo při měření už při malých závěrných napětích ke vzniku mikroplazmy.

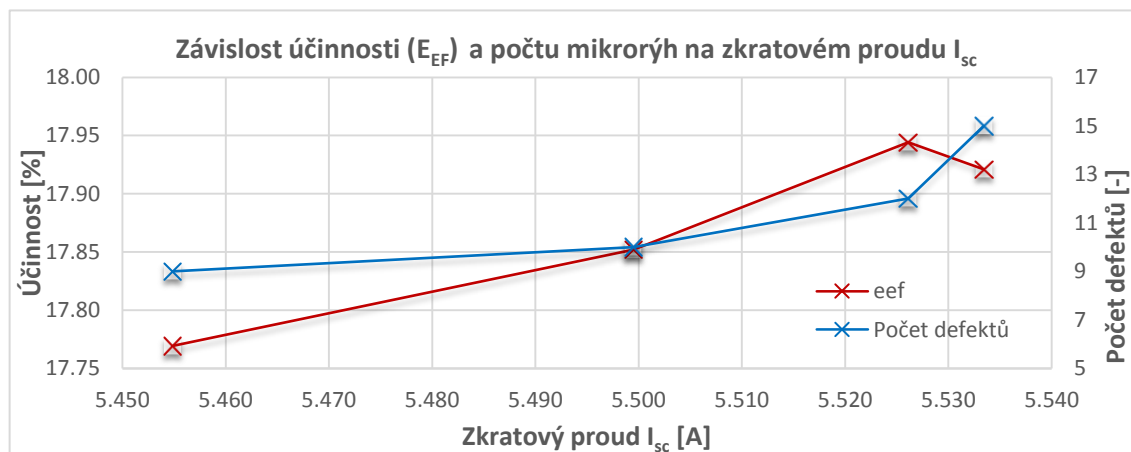
Úlomek solárního článku s mikrorýhou byl analyzován metodou EBIC za pomoci skenovacího elektronového mikroskopu Tescan Fera 3. Na obr. 56 -A je vidět topografie

povrchu monokrystalického solárního článku, o níž informují sekundární elektrony. Při větším zvětšení bychom viděli pyramidovou strukturu vzniklou chemickým leptáním, jenž byla zobrazena u dalšího měřeného vzorku na obr. 43. V této fázi však byla pozornost upřena k odhalenému PN přechodu, kdy je jasně vidět na obr. 56 - B z barevné škály proudové odezvy defekt mikro-škrábance.



Obr. 56: SEM (A) a EBIC (B) analýza mikrorýhy u mono-Si článku (wfr 14, viz tab. 3)

Defekt mikrorýhy (neboli mikroškrábanece) byl identifikován i na dalších mono-Si článcích. Počet těchto defektů v jednotlivých článcích má však pouze orientační charakter a je vyneseno v grafu na obr. 57. Přesný počet nebyl stanoven, vzhledem k časové náročnosti prozkoumání celé plochy solárního článku metodou PEM v laboratorních neautomatizovaných podmínkách.



Obr. 57: Graf závislost účinnosti a počtu defektů na zkratovém proudu (pro vzorky v tab. 3)

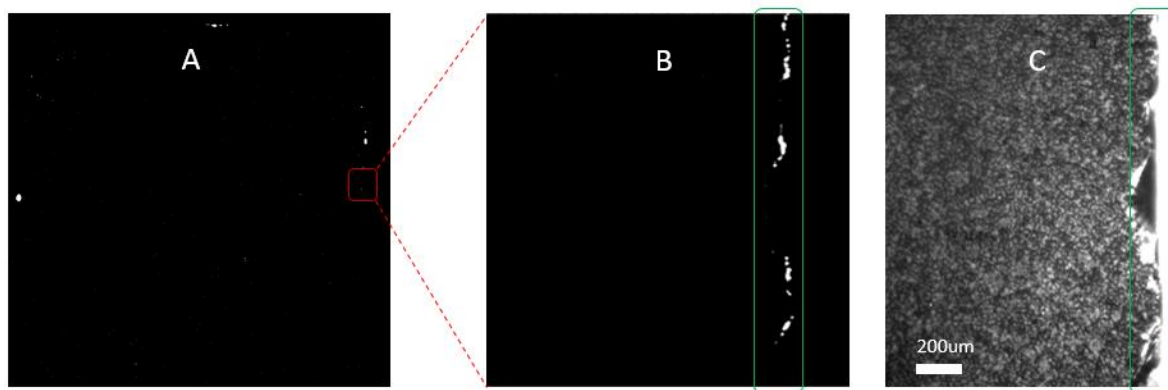
Reprezentativní skupina analyzovaných vzorků uvedená v tab. 3 měla velmi nízkou variabilitu celkové účinnosti jednotlivých vzorků. Přesná informace počtu mikrodefektů mohla být klíčovou v korelaci účinnosti solárního článku s počtem defektů v ploše. Výskyt mikroškrábance neměl žádný opakující se patern, který by mohl jasně poukázat na jednu z výrobních operací, jakožto na místo vzniku defektu. I přesto se ukázalo, že analýza mikroskopickou

metodou elektroluminiscence přináší zpřesňující informaci v kvalitativním hodnocení defektivy, jelikož při standardních metodách EL a MP by tento typ defektu nebyl lokalizován. Faktor zvětšení zobrazení lokální emise v mikroploše článku přináší benefit, ovšem na laboratorní úrovni na úkor časové náročnosti.

6.5.4 PEM analýza polykrystalických solárních článků

V této části práce byla pozornost zaměřena na PEM analýzu polykrystalických solárních článků, jejichž defektivita byla interpretována pomocí základní metody EL a MP v kapitole 6.3. Z tohoto makroskopického pohledu, byly definovány na předložených vzorcích defekty jako např. mikropraskliny, hranice zrn, zhmožděné hrany aj....

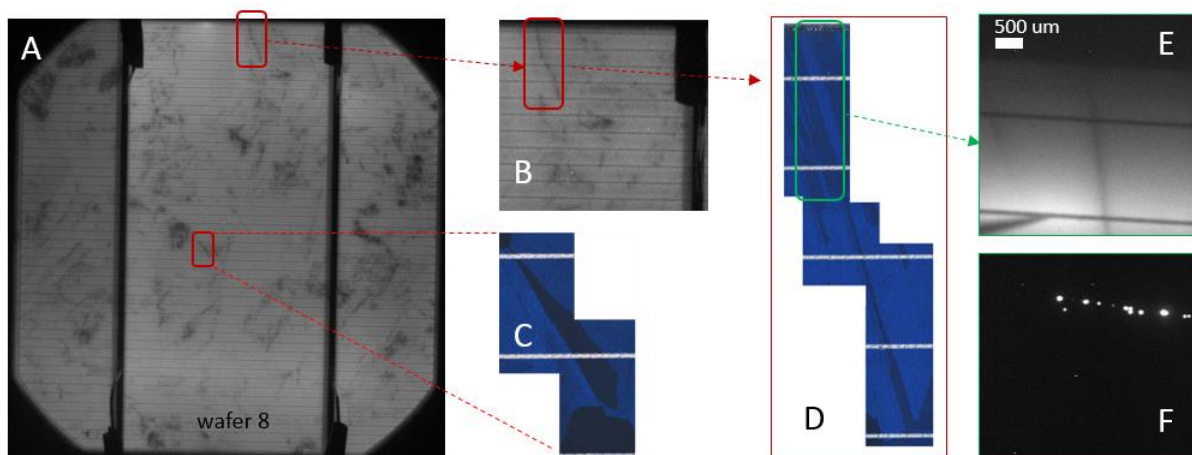
Pokud se podíváme právě na poslední jmenovaný defekt metodou PEM v režimu MP, pak v mikrooblasti okraje solárního článku byla ihned získána obrazová informace o kvalitě hrany, a to i v místě kde makroskopicky mikroplazma detekována nebyla. Na obr. 58 je zobrazena hrana článku (zeleně označena) třemi metodami. Snímek A zobrazuje standardní metodu MP (tedy makroskopické zobrazení) na solárním článku č. 8. Snímek B je pořízen metodou PEM v režimu MP a charakterizuje červeně vyznačenou oblast snímku A. Poslední obrázek C je automaticky pořizován při metodě PEM, ovšem ve viditelné oblasti spektra. Jedná se tedy o klasický snímek optické mikroskopie, před tím než je komora pracoviště PEM zatemněna k měření v režimu MP nebo EL.



Obr. 58: MP na hraně polykrystalického článku (wfr 8, viz tab. 4) při $I = 0.37\text{A}$ a $U = 1,3\text{V}$. Snímek A – standardní MP., B – PEM v režimu MP červeně vyznačené oblasti a C – klasická optika

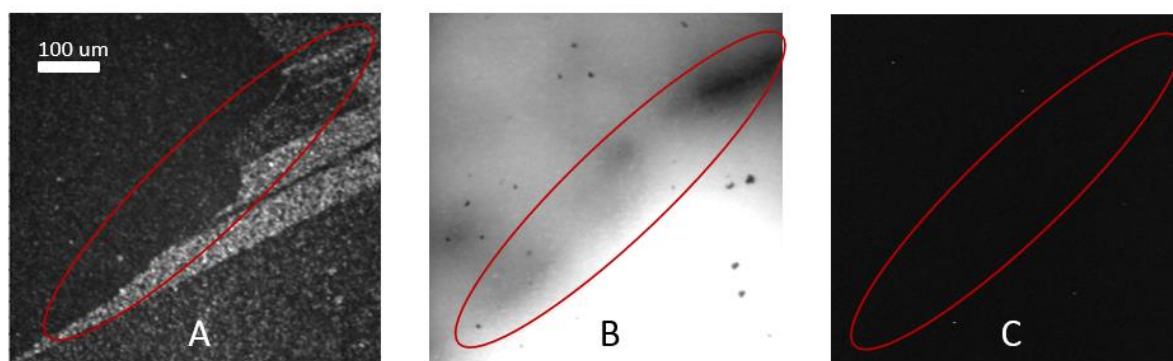
Jednoznačnou výhodou snímků B a C metody PEM je vzájemná provázanost obrazové informace, kterou uživatel získá v krátkém časovém úseku. Můžeme tedy říci, že obr. 58 – B je výstižně doplněn snímkem C, na němž je ukázka mechanicky uštipané hrany solárního článku. Oba snímky jsou velikostně ve stejném poměru, pořízeny při použití objektivu s optickým zvětšením 10x.

V teoretické části předkládané práce byla v kapitole 4.5.1 zmíněna teze o falešné analýze mikroprasklin při použití metody EL. Lze říci, že dnes neexistuje software, jenž by na základě výsledků měření metodou EL spolehlivě rozlišil sporná místa.



Obr. 59: A- metoda EL poly-Si článek č. 8; B – defekt prasklinového typu; C- optická mikroskopie zrna poly-Si; D – metoda PEM v režimu EL; E- metoda PEM v režimu MP

Demonstrativní příklad takové chybné analýzy můžeme vidět na obr. 59, kde na snímku A byly červeně vyznačeny mikropraskliny. Až při rozšíření charakterizace článku o metodu optické mikroskopie (obr. 59 - C a D) a metodu PEM (obr. 59 - E a F) bylo prokázáno, že se nejedná o mikropraskliny, nýbrž o hranice zrn. Pro snímky optické mikroskopie byl využit optický mikroskop NIKON ECLIPSE L200N. Výsledné snímky topografie povrchu solárního článku a jeho zrnitosti v korelaci s metodou PEM v režimu EL i MP vedou k jasné informaci o původu defektu.



Obr. 60: Hranice zrn polykrystalického článku; A- optická mikroskopie zrna; B – metoda PEM v režimu EL; C – metoda PEM v režimu MP.

Výše uvedené tvrzení je prokázáno na obr. 60. Topografie hranice zrn zobrazená optickou mikroskopií v rámci aparatury PEM přesně koreluje s výsledkem elektroluminiscence v mikrooblasti. Metoda PEM v režimu měření MP na snímku C celou charakteristiku doplňuje

a potvrzuje teorii, že ke vzniku mikroplazmy dochází v místech s mechanicky narušeným PN přechodem, tedy zejména v oblastech poškozeného povrchu ale i některých mikropřasklin a poškozených hran solárních článků.

Poznatky mikroskopické luminiscenční analýzy byly publikovány např. v *Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (Luminescence Diagnostics of Photovoltaic Cells)*.

6.6 Polarizační analýza metody elektroluminiscence

V teoretické části práce byl zmíněn význam metody elektroluminiscence patřící mezi nejpoužívanější luminiscenční metody detekce defektů, jejíž modifikace se používají napříč polovodičovým průmyslem. To je dáno tím, že diagnostické metody využívající lokální emise světla (zářivé rekombinace párů elektron – díra) v infračervené oblasti, mají velký inovativní potenciál.

Luminiscenční záření emitované solárními články má vlnovou povahu, což přináší potenciální možnost využití některých charakteristických vlastností vlnění jako intenzity a nově i polarizace. Jak může být patrné z předchozích kapitol této práce, intenzita luminiscenčního záření patří mezi základní charakteristiky metody EL a její modifikací. Naproti tomu polarizace, jejíž vlastnost vyjadřuje směr kmitání elektrického vektoru elektromagnetické vlny, je v oblasti bandgap luminiscence křemíkových článků neprozkoumaným prvkem. Inovace měřicího pracoviště standardní metody elektroluminiscence (uvedeného 5.5.4) k využití polarizační analýzy a metodiky jejího použití patří mezi cíle této práce.

6.6.1 CCD detektor - bandgap luminiscence

Nejdůležitějším prvkem měřicího pracoviště metody EL je CCD detektor. Měřicí pracoviště metody EL na VUT v Brně je vybaveno CCD kamerou typu G2-3200, jejíž přesná specifikace je uvedena v 5.6. Spektrální rozsah tohoto CCD detektoru leží v oblasti 300 až 1100 nm. Z maximální hodnoty spektrálního rozsahu plyne, že detektor je schopen snímat tzv. bandgap luminiscenci.

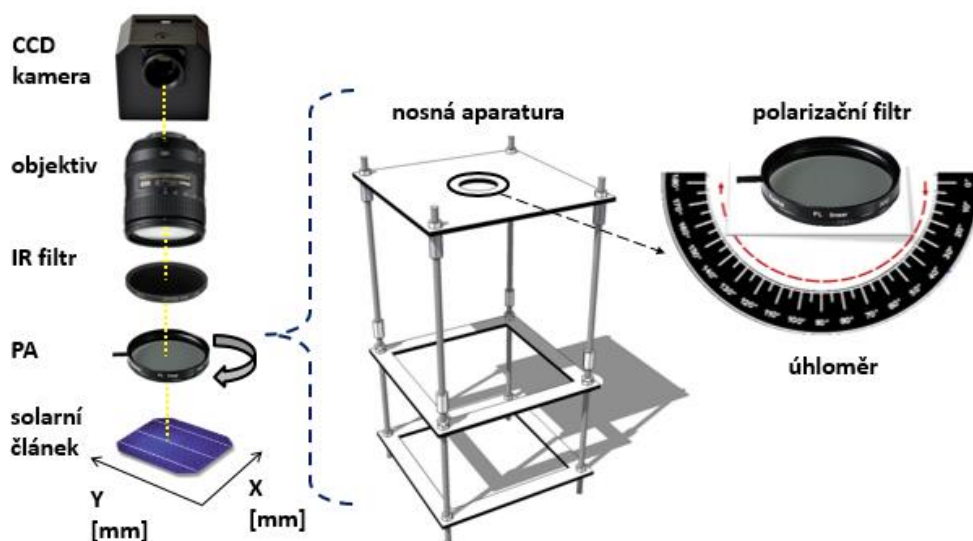
Až dosud nebyla v práci popisovaná metoda EL nijak členěna z hlediska vlnové délky emitovaného záření. Metodu EL můžeme však rozdělit do dvou kategorií pracujících s bandgap a sub-bandgap luminiscencí. Jak již název napovídá, rozdělení je na základě hodnoty energie respektive vlnové délky záření, u něhož se jako měřítko používá energie zakázaného pásu (v angličtině bandgap). Vlnová délka 1150 nm odpovídá bandgap energii křemíkového článku, čemuž odpovídá ekvivalent energie 1,12 eV. Zjednodušeně hovoříme o energetickém rozdílu mezi vrcholem valenčního pásu a dnem kondukčního pásu. Pokud tedy hovoříme o standardní metodě EL (tak jako byla dosud v textu uváděna), pak hovoříme o bandgap

elektroluminiscenční metodě. Záření, které má vlnovou délku delší než bangap luminescence křemíku je označováno jako sub-bangap luminescence. Vzhledem k metodě EL pak hovoříme o sub-bandgap elektroluminiscenční metodě.

Rozšířená metoda polarizační analýzy bude tedy probíhat pro bangap elektroluminiscenci za teplotně a elektricky stálých podmínek.

6.6.1 Úprava měřicího pracoviště metody elektroluminiscence

Původní pracoviště metody EL, které můžeme vidět na obr. 31, bylo rozšířeno o polarizační analýzu. Do optické soustavy byl vložen lineární polarizační filtr s nosnou aparaturou. Polarizační filtr má v této sestavě funkci polarizačního analyzátoru (PA). Při prvních experimentech byl polarizační filtr umístěn přímo na objektivu za IR filtrem. Při každém pootočení filtru však docházelo k rozostření optické soustavy vlivem mírného posunu kamery. Výsledné snímky tak nebylo možné relevantně vyhodnotit. Z toho důvodu byla do temné komory vyrobena a přidána nosná aparatura jako držák polarizačního filtru u objektivu kamery. Byly tak vyřešeny potíže s rozladěním a zároveň nosná aparatura vymezovala nežádoucí pohyb polarizačního analyzátoru mimo optickou osu při pootočení.



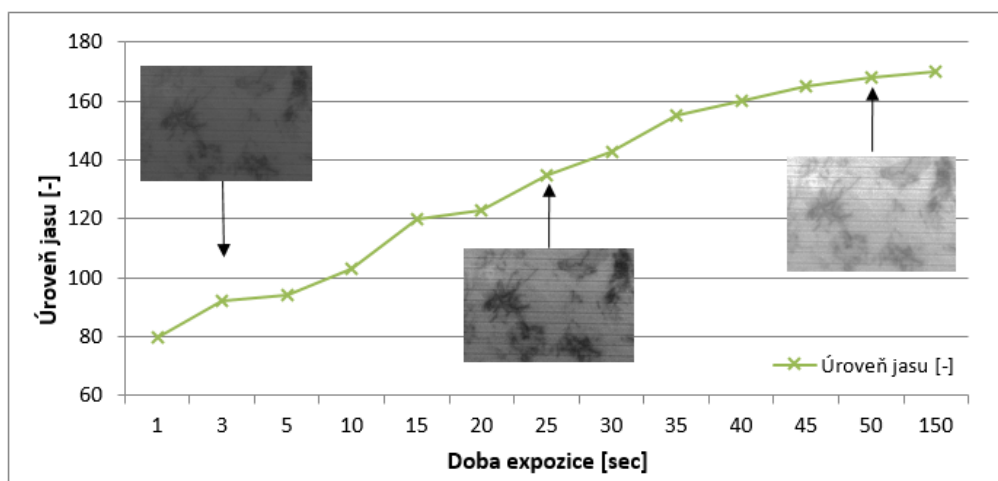
Obr. 61: Modifikovaná sestava měřicího pracoviště metody elektroluminiscence

Na obr. 61 je zobrazena nosná aparatura polarizačního filtru a celkové schéma modifikované optické sestavy měřicího pracoviště metody elektroluminiscence. Kontaktní pole analyzovaného článku se nachází ve čtvercovém výřezu spodní desky na dně temné komory. Jako detektor odezvy luminiscenčního záření byla ponechána již zmíněná specializovaná kamera G2-3200 s 3,2MPx CCD čipem typu KAF-3200ME. Efektivní dvoustupňové chlazení s Peltierovými články udržuje čip hluboce zmrazený, čímž je minimalizován tepelný šum.

Detailní popis detektoru se nachází v kapitole 5.6, kde je mimo jiné uvedeno, že kvantová účinnost v IR oblasti (při $\lambda = 1000$ nm) je přibližně 7 %. V porovnání s pracovištěm metody PEM, které je osazeno detektorem Hamamatsu S7170, se jedná o méně než poloviční hodnotu. Základní porovnání obou detektorů emise záření je přehledně uvedeno v tab. 1.

6.6.2 Nastavení CCD kamery G2-3200

Jelikož se pohybujeme v oblasti blízkého IR záření a kvantová účinnost použitého CCD detektoru leží na hranici Gaussova rozdělení vlnové délky bandgap luminiscence, bylo zapotřebí pro kvalitativní rozlišení sekvence snímků zajistit jejich maximální možnou vstupní kvalitu. Jedním z zásadních parametrů ovlivňujících výslednou kvalitu je expoziční čas. Experimentálním měřením bylo prokázáno, pro použitý model kamery G2-3200 (viz. obr. 34), že optimální nastavení doby expozice pro měření s polarizační analýzou je 25 sekund. Doba expozice a teplota chlazení CCD čipu (z důvodu snížení termálního šumu na -20°C) byla nastavována prostřednictvím ovládacího programu kamery nazývaného SIMS (Simple Image Manipulation System).



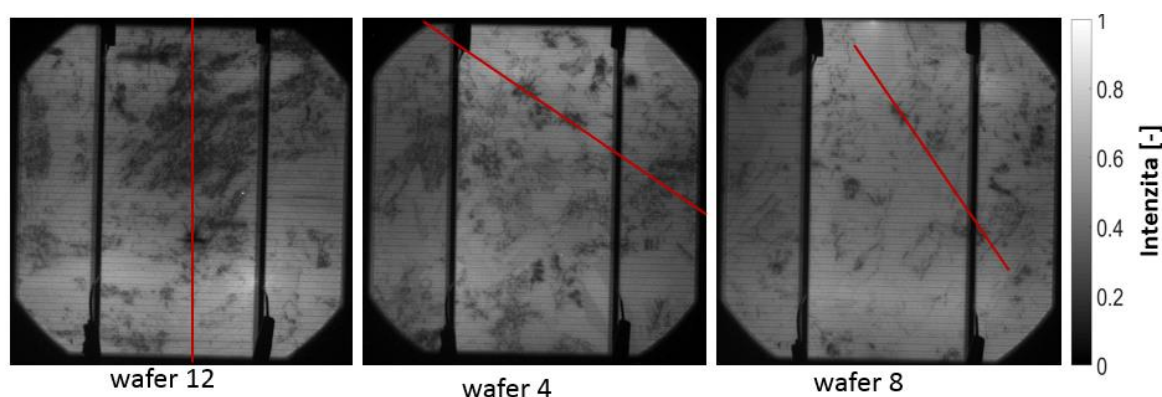
Obr. 62: Závislost doby expozice CCD kamery na úrovni jasu elektroluminescenčního snímku

K vyhodnocování metody EL a polarizační analýzy byl použit vývojový software Matlab. Výsledky luminiscence, tzn. snímky ve stupních šedi (tzv. grayscale obrazy) jsou složeny v jedné 8-bitové rovině (vrstvě) pixelů, kde hodnoty jasu leží v rozsahu 0-255 [56]. Snímky mají optimální obrazovou kvalitu, umožňující další programové zpracování (pixelovou analýzu) při době expozice 25 sekund. Doba expozice byla experimentálně zjištěna. Závislost měření jasu snímků na expozičním čase je uvedena na obr. 62.

6.6.3 Vstupní charakterizace solárního článku

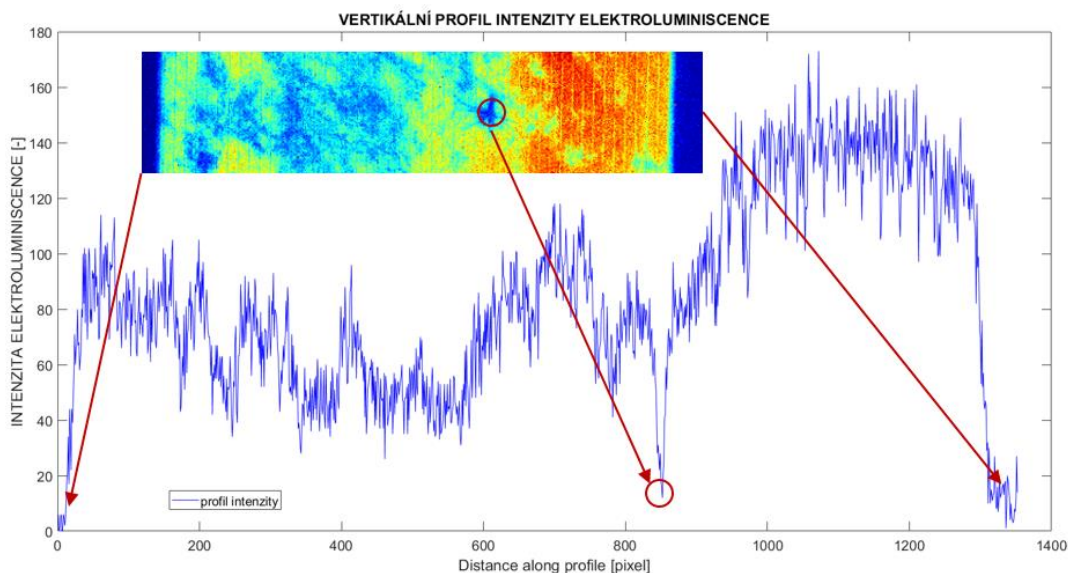
Na základě experimentálních dat z předchozích kapitol byly pro ukázkou metodiky polarizační analýzy vybrány tři polykrystalické články z tab. 4. Výsledky bandgap

elektroluminiscence byly popsány v kapitole 6.3 na binárních snímcích. Ty jsou velmi praktické z pohledu makro-charakterizace. Pro polarizační analýzu bylo však třeba použít snímky ve stupních šedi nebo jejich alternativy v mapě barev (se stejným rozsahem intenzity jako původní snímek) jako funkce Matlabu. Výsledné snímky měření (při stejné době expozice) jsou uvedeny na obr. 63. V témže obrázku můžeme nalézt červeně vyznačené profilové řezy, na jejichž základě byla zkoumána a posuzována (pomocí Matlabu) míra polarizace daných vzorků, respektive konkrétních bodů defektních oblastí.



Obr. 63: Výsledky standardní metody EL ($I = 1,9A$; $U = 1,2V$)

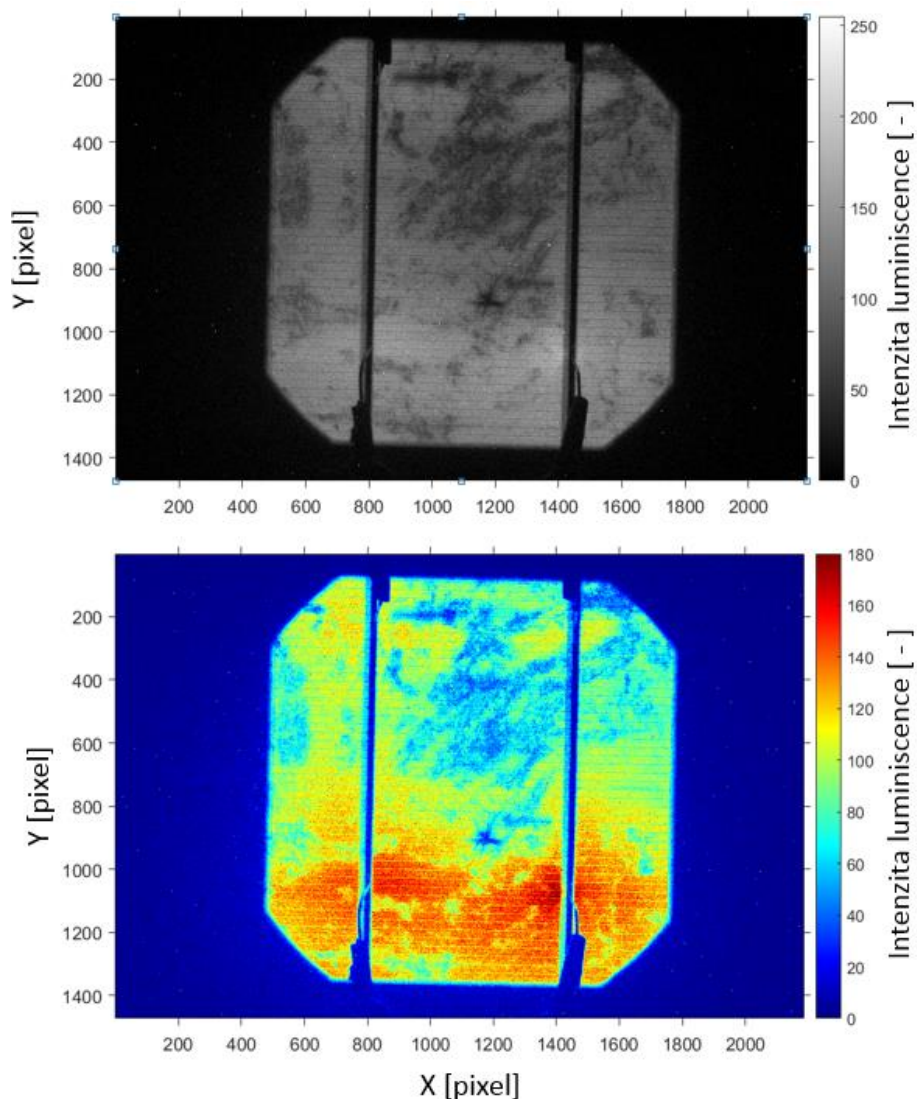
Intenzita luminiscence vertikálním profilovým řezem přes defektní oblasti (mikroprasklin a hranic zrn) solárního článku č.12 je zobrazena v grafu na obrázku obr. 64.



Obr. 64: Vertikální profil intenzity zářivé rekombinace pro solární článek č.12.

Přehledně jsou v grafu označeny významné „skoky“ intenzity, zleva: horní okraj článku, mikroprasklina, dolní okraj článku. Z toho plyne správná interpretace obr. 64, kdy směr

vertikálního profilu vede shora (TOP wafer) dolů (BOTTOM wafer), přičemž profilová vzdálenost uvedená v pixelech odpovídá ose Y na obr. 65 níže.



Obr. 65: Luminescence plochy (wafer 12) - grayscale (nahore) a Matlab JET mapa (dole)

6.6.4 Defekty polarizační analýzy

Dislokace v solárních článcích emitují jejich vlastní luminescenční energie spojené s hluboko lokalizovanými energetickými stavy v zakázaném pásu (bandgap) [57]. Víme, že toto záření má delší vlnovou délku než bandgap luminescence křemíku a je známé jako sub-bandgap luminescence. Dislokace se generují především během růstu krystalu jako výsledek tepelného stresu. Anizotropie v modulu pružnosti křemíku, vycházející z různých krystalových orientací, zavádí smykové napětí do skluzové roviny a tím generuje dislokace. Ty se vyskytují u hranic zrn. Přítomnost dislokace v krystalu vyvolává plastickou deformaci krystalové mřížky a

způsobuje tak napěťové pole okolo dislokace, potenciálovou bariéru [58]. Na sub-bandgap úrovni byla polarizace částečně popsána právě pro dislokace [59], [60] solárních článků.

Oproti tomu oblast bandgap elektroluminiscence, kterou se zabývá tato práce, nebyla experimentálně popsána v souvislosti s potenciální polarizací záření defektních oblastí. Proto je jedním z cílů předkládané práce zmapovat polarizační fenomén v oblasti bandgap luminiscence.

Předpokládejme tedy, že polarizace luminiscence se vyskytuje při anizotropním rozložení elektrických nábojů, což může nastat při určitých defektech solárních článků. Dislokace, mikropraskliny, ale i další defekty krystalu vytváří napěťová pole, potenciálové bariéry a tím snižují účinnost SC. Při luminiscenční diagnostice tyto potenciálové bariéry způsobí, že opticky rozlišujeme rozdílnou proudovou hustotu v defektních a bezdefektních oblastech (rozdílná úroveň jasu).

Luminiscenční polarizační efekt tedy může být diskutován ve vztahu k nábojové anizotropii defektu mikropraskliny, jenž je detekovatelný na bandgap luminiscenční úrovni a který ve velmi zjednodušené formě uvažujeme jako čárovou poruchu krystalografické mřížky.

6.6.1 Intenzita polarizovaného luminiscenčního záření

Předpoklad polarizačního měření elektroluminiscence říká, že pokud je vyzařovaná luminiscence defektu částečně lineárně polarizovaná, měl by při analýze dat platit Malusův zákon. Projde-li lineárně polarizované luminiscenční záření ($I_{EL(x,y)}$) polarizačním analyzátozem (PA), pak intenzita prošlého luminiscenčního záření ($I_{ELp(x,y)}$) je závislá na vzájemné úhlové poloze (δ) polarizační roviny zářivého toku luminiscence a polarizačního analyzátoru, kterým toto záření prochází. Uvedenou definici můžeme vyjádřit dle rovnice (23):

$$I_{ELp(x,y)} = I_{EL(x,y)} \cos^2 \delta, \quad (23)$$

kde x , y jsou souřadnice daného bodu v ploše solárního článku, jehož intenzita luminiscence je posuzována.

Pro měření polarizačního efektu je nezbytný předpoklad, že elektroluminiscence probíhá v propustném směru za konstantního proudu a napětí na solárním článku a také konstantních teplotních podmínek. To je nezbytné, jelikož víme, že intenzita emitovaných fotonů souvisí s rekombinačními mechanismy, materiálovými a optickými vlastnostmi polykrytalického materiálu, kde existuje silná závislost na použitém napětí PN přechodu. Torben Potthoff definuje (viz. [61]) závislost lokálního napětí PN přechodu v bodě (x) na intenzitě luminiscenčního toku dle vztahu (24):

$$\Phi_{(x)} = C_{(x)} \exp\left(\frac{U_{(x)}}{\frac{kT}{q}}\right), \quad (24)$$

kde $C_{(x)}$ je kalibrační faktor závislý na materiálových a optických vlastnostech solárního článku a CCD kamery. Napětí $U_{(x)}$ představuje napětí na solárním článku, jenž je výrazně vyšší než termální napětí. Termální napětí je definováno poměrem Boltzmanovy konstanty ku elementárnímu náboji, krát absolutní teplota článku. Ze vztahu pro stupeň polarizace uvedeného v rovnici (18) je tak vyjádřena závislost pro intenzitu polarizačního záření daného bodu v ploše solárního článku o souřadnicích x, y (25):

$$I_{ELp(x,y)} = p_{(x,y)} * C_{(x,y)} \exp\left(\frac{U_{(x,y)}}{U_{T(x,y)}}\right), \quad (25)$$

Z výše uvedených vztahů plyne, že vstupní podmínky při měření polarizační analýzy mohou zásadně ovlivnit výsledky měření. Při změně teploty solárního článku dochází ke změně termálního napětí, což za konstantních podmínek $U_{(x,y)}$ vede k zvýšení intenzity luminiscenčního záření. Takováto změna přináší šum do polarizační analýzy.

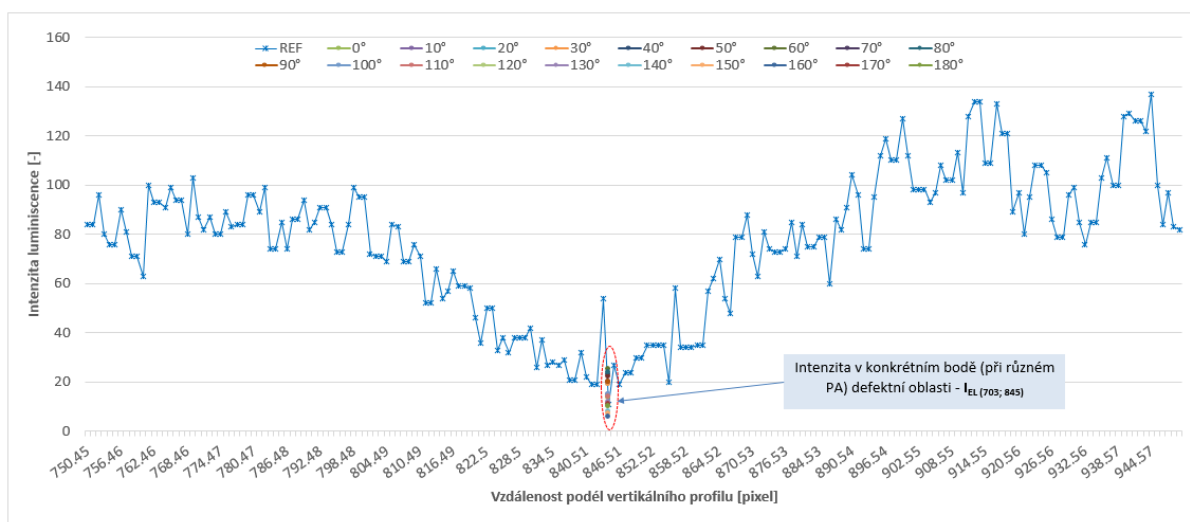
6.6.2 Polarizační analýza vybraného vzorku

Ze skupiny analyzovaných poly-Si článků, jejichž elektrické parametry byly uvedeny v kapitole 6.3.1, byl jako první vybrán vzorek č. 12 s typickou vnitřní mikroprasklinou. Intenzita luminiscence vertikálního profilového řezu přes defektní oblasti tohoto vzorku je zobrazena v grafu na obr. 63. Jako optimální nastavení pro pozorování elektroluminiscence byl použit z předchozích měření proud 1,9 A a napětí 1,2V. Luminiscence článku zapojeného v propustném směru a umístěného v temné komoře, byla tedy buzena konstantní proudovou hustotou o hodnotě přibližně 12,2 mA/cm², při teplotě měření 23 °C. Teplota byla kontrolována pomocí ECT.

Výsledky referenčního měření bez PA v optické soustavě reprezentují snímky na obr. 64 a obr. 65. Pro následná měření byl do optické soustavy vložen PA a každý vzorek byl dále podroben rozšířené polarizační analýze. Orientace PA vůči poloze solárního článku se měnila vždy po 10°. Úhel pootočení byl odečítán pomocí úhlové stupnice na nosné aparatuře polarizačního filtru. K tomu, aby byla potvrzena polarizační závislost, stačí dle Malusova zákona devět měření, tedy pootočení o 90°. Při experimentech v rámci práce byl však každý článek podroben analýze v rozsahu 180° pootočení PA, tzn. 18 pootočení PA s krokem 10°.

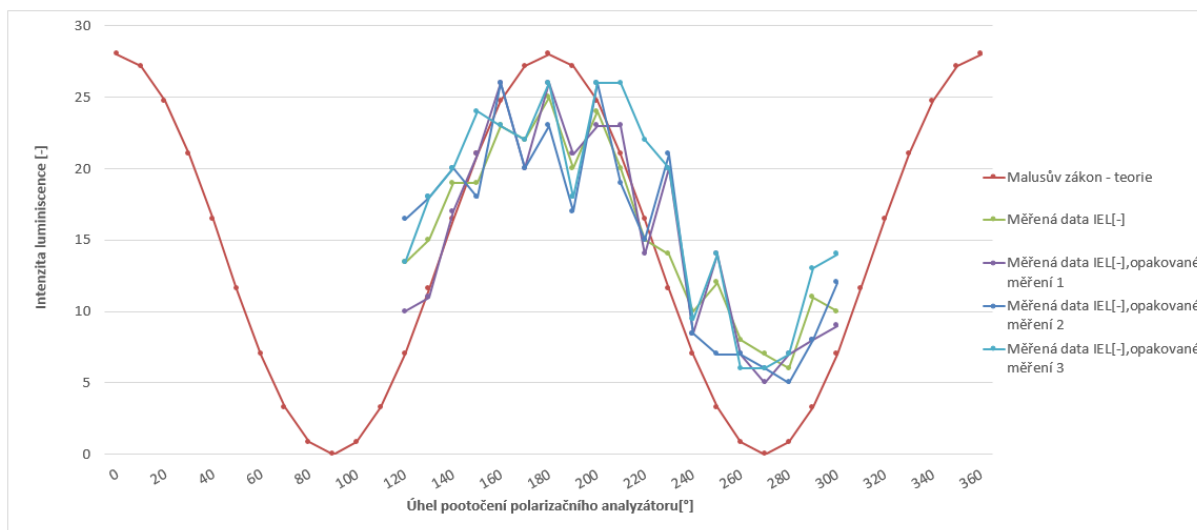
Po rozšířeném měření byl referenční vertikální profil pro solární článek č. 12, jenž je zobrazen na obr. 64, doplněn o intenzity luminiscence při různém pootočení polarizačního analyzátoru. Tento krok je zobrazen v grafu na obr. 66. Při zobrazení všech vertikálních profilů

(pro každé pootočení PA) intenzity v jednom grafu zaniká v šumu podstatná informace o konkrétním bodu defektní oblasti mikropraskliny. Proto je pro názornost v grafu na obr. 66 zobrazeno lokální zvětšení (viz osa x v oblasti od cca 750 až 950 pixelů) defektní oblasti mikropraskliny s různými intenzitami při otáčení PA v konkrétním jednom bodu (vyznačeno červeně). Z rozptylu hodnot červeně zakroužkované oblasti je patrné, že zde dochází ke změně intenzity v závislosti na úhlu pootočení PA. Směrodatná odchylka hodnot, v rámci jednoho uvedeného bodu ($I_{EL}(703; 845)$) oblasti mikropraskliny v ploše solárního článku, vychází přibližně 5,98 pixel-ů.



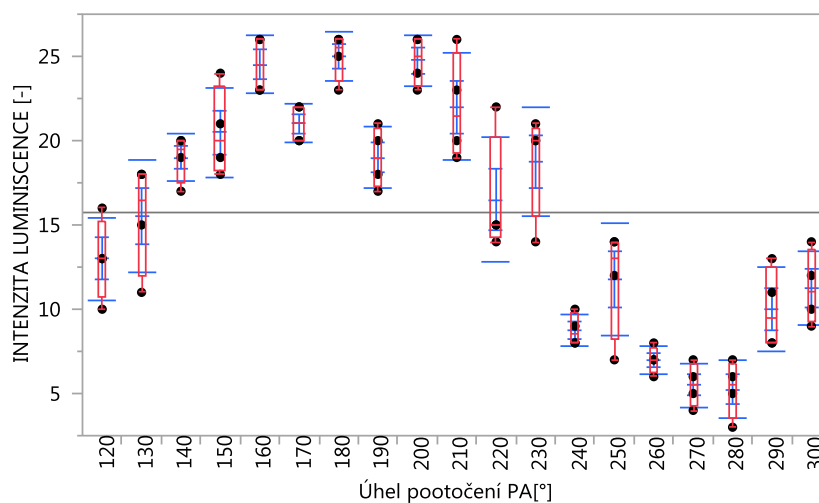
Obr. 66: Změna intenzity luminiscence vertikálního profilu v závislosti na úhlu pootočení PA vzorku č. 12 v daném bodě

Pokud tuto směrodatnou odchylku vyjádříme jako závislost změny intenzity luminiscenčního záření na úhlu pootočení polarizačního analyzátoru (červeně zakroužkované oblasti zobrazené obr. 66), pak získáme částečnou sinusoidní závislost, jenž je zobrazena v grafu na obr. 67. Do grafu je zároveň vložen teoretický sinusoidní průběh Malusova zákona pro danou oblast, jenž je vypočítán dosazením maximální hodnoty ze souboru měření daného bodu do vztahu (23). Posunutí na ose x při měřených datech je způsobeno počáteční orientací solárního článku (respektive defektu) v temné komoře. Při počátečním pootočení PA o 10° není známá rovina polarizace.



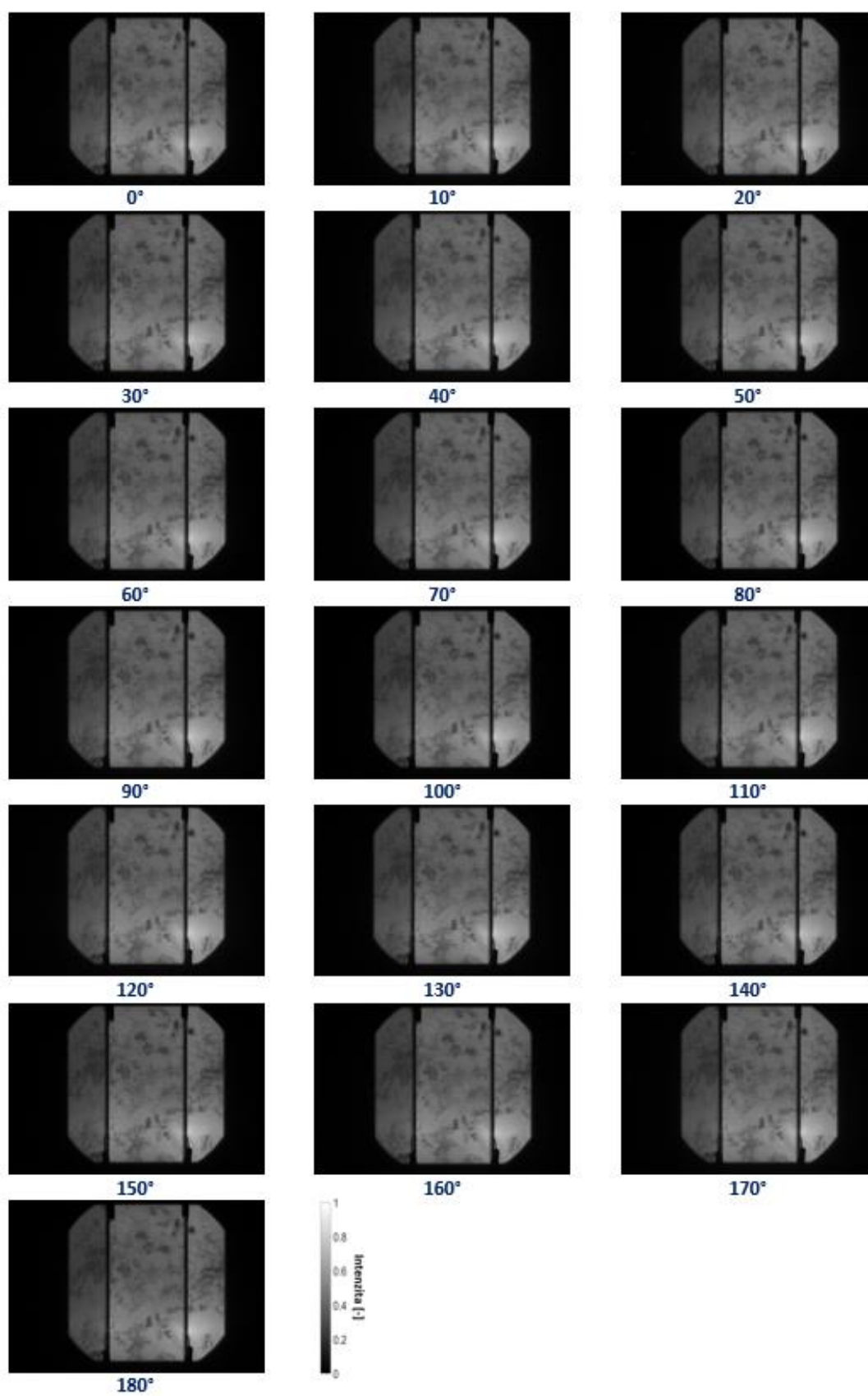
Obr. 67: Změna intenzity luminiscence ve vertikálním profilu v závislosti na úhlu pootočení PA vzorku č. 12

Průměrná směrodatná odchylka opakovaných měření vycházející z obr. 68 činí přibližně 1,7 pixelu. V porovnání s celkovou variabilitou měření (jenž vychází přibližně 5,98 pixelů) v rámci zkoumaného bodu ($I_{EL} (703; 845)$) oblasti mikropraskliny v ploše solárního článku, se tedy opakovatelnost měření soustavy pohybuje do 30% původní variability.



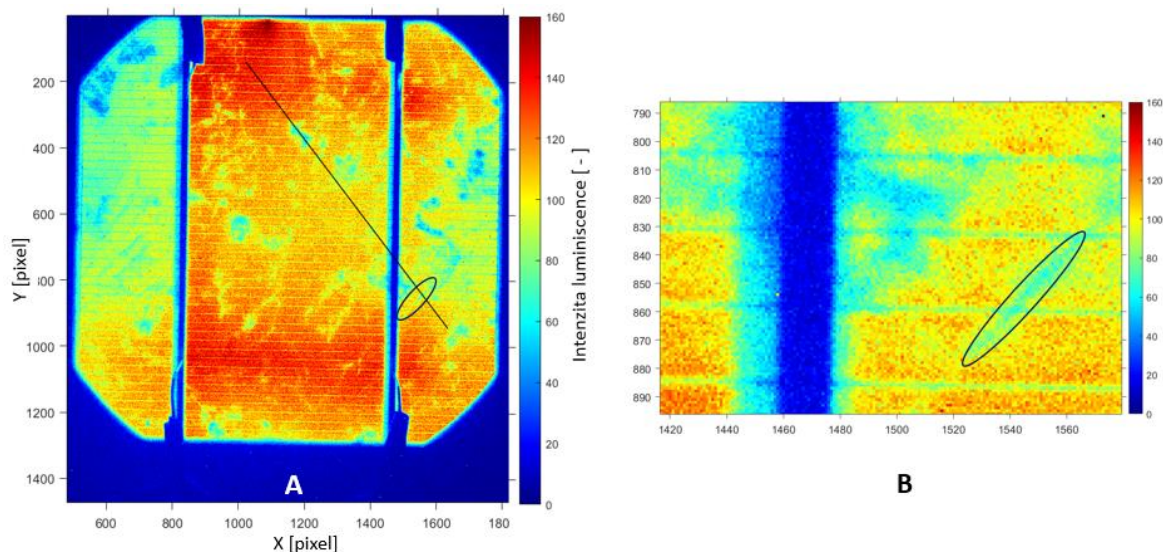
Obr. 68: Opakovaná měření polarizační analýzy u vzorku č.12 (data zpracována v programu JMP)

Stejná, výše popsaná metodika byla uplatněna v rámci všech dalších měření. Je nutné konstatovat, že pozorovaná sinusoidní závislost se u všech mikroprasklin lišila, rozdílným stupněm polarizace. U některých vzorků nebyla pozorována vůbec. Bez pixelové analýzy v programu Matlab je změna intenzity v defektní oblasti nerozlišitelná, což je patrné z obr. 69, na němž jsou uvedena opakovaná elektroluminiscenční měření se změnou polohy PA u dalšího zkoumaného vzorku č.4.



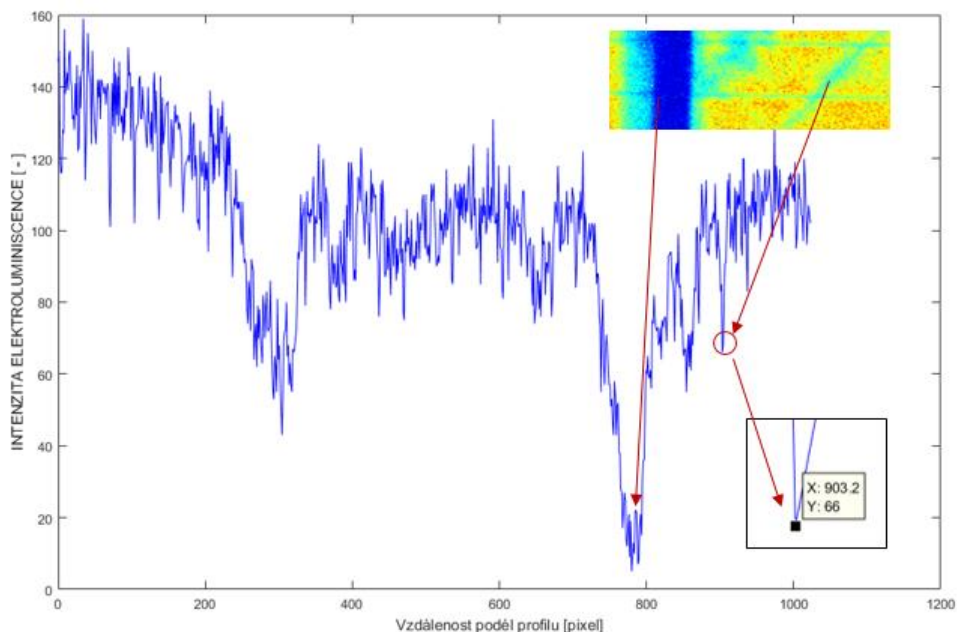
Obr. 69: Opakovaná elektroluminiscenční měření se změnou polohy PA u vzorku č.4

Jako příklad, kdy nebyla detekována žádná závislost je uveden solární článek č. 8 (zobrazený na obr. 63). Podle maximální hodnoty intenzity daného článku byla provedena úprava barevné škály viz obr. 70 (JET mapa Matlab).



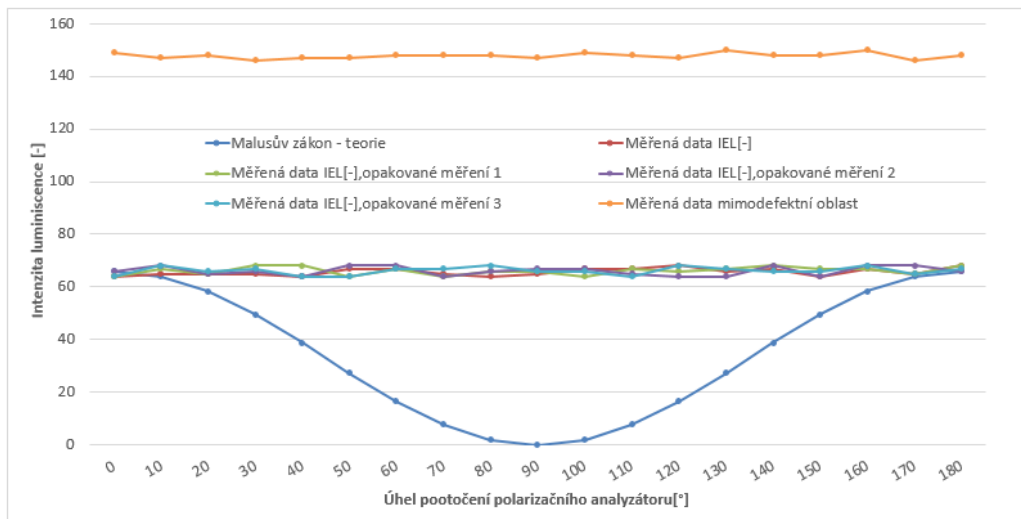
Obr. 70: Matlab JET mapa luminiscence celé plochy solárního článku č. 8 (A) a detail mikropraskliny (B)

Následný profilový řez tohoto článku procházející přes vyznačenou mikroprasklinu je uveden v grafu na obr. 71. Analyzovaný bod v oblasti mikropraskliny leží v zobrazených souřadnicích x, y (I_{EL} (903; 837)).



Obr. 71: Šikmý profilový řez luminiscence článku č. 8. Vzdálenost podél profilu od shora dolů.

Z grafu na obr. 72 je patrné, že není pozorována žádná polarizační závislost. Průběh intenzity záření při různých pootočení polarizačního analyzátoru je srovnatelný s mimodefektní oblastí a i při opakovaných měřeních se směrodatná odchylka měření pohybovala v průměru okolo 1,2 pixelu.



Obr. 72: Změna intenzity luminiscence v bodě I_{EL} (903; 837) profilu v závislosti na úhlu pootočení PA vzorku č. 8

6.6.3 Stupeň polarizace luminiscenčního záření

Míra polarizace je kvantitativně popsána veličinou zvanou stupeň polarizace. Ten může být vyjádřen také jako poměr orientace maximální a minimální intenzity luminiscence zaznamenané polarizačním analyzátozem. Pro daný bod v ploše solárního článku (o souřadnicích x, y) můžeme stupeň polarizace p vyjádřit dle rovnice (26) níže [42]:

$$p(x, y) = \frac{I_{(x,y)\max} - I_{(x,y)\min}}{I_{(x,y)\max} + I_{(x,y)\min}}, \quad (26)$$

kde x, y jsou souřadnice plochy solárního článku a I je intenzita luminiscenčního záření v daném bodě. Pokud nastane situace dokonale polarizované vlny, stupeň polarizace je roven jedné. Naopak pokud bychom měli nepolarizovanou vlnu, pak stupeň polarizace je roven nule. Obecně tedy platí, že vlny částečně polarizované musí mít stupeň polarizace v rozmezí 0 až 1.

U prezentovaného metodického postupu, byla při opakovaném měření dosažena (viz. graf na obr. 68) průměrná míra polarizace 0,65. Jedná se tedy o částečně lineárně polarizovanou bandgap luminiscenci v oblasti mikropřaskliny polykrystalického solárního článku. Zdrojová data pro uvedené měření jsou uvedena v tab. 6 níže.

Tab. 6: Opakovaná měření polarizační analýzy u vzorku č.12

Úhel pootočení PA [°]	Malusův zákon - teorie	Měřená data $I_{EL}[-]$	Měřená data $I_{EL}[-]$,opak. měření 1	Měřená data $I_{EL}[-]$,opak. měření 2	Měřená data $I_{EL}[-]$,opak. měření 3
120	7	13	10	16	13
130	12	15	11	18	18
140	16	19	17	20	20
150	21	19	21	18	24
160	25	23	26	26	23
170	27	22	20	20	22
180	28	25	26	23	26
190	27	20	21	17	18
200	25	24	23	26	26
210	21	20	23	19	26
220	16	15	14	15	22
230	12	14	20	21	20
240	7	10	8	8	9
250	3	12	14	7	14
260	1	8	7	7	6
270	0	7	5	6	6
280	1	6	7	5	7
290	3	11	8	8	13
300	7	10	9	12	14
p	1	0.61	0.68	0.68	0.63

6.6.1 Celkové výsledky měření míry polarizace

Stupeň polarizace, jakožto kvantitativní popis účinnosti polarizace, se v rámci analyzovaných článků a jejich mikroprasklin velmi lišil. U výše uvedených dat, při průměrném stupni polarizace 0,65, se jednalo o maximální stupeň polarizace, jenž byl v rámci jedné sady polykrystalických článků pozorován.

Tab. 7: Celkové výsledky měření stupně polarizace na sadě (25 článků) poly-Si článků

Wafer	Počet mikroprasklin v ploše článku [-]	Stupeň polarizace [-]
11;12;4;8;5;21;14;18	1 - 3	0 - 0,68
1;7;3;9;2;15;20;	1 - 2	0 - 0,36
25;23;19;10;6;17;22	1	0 - 0,23
13;24;16;	0	0

U některých vzorků, respektive mikroprasklin nebyla pozorována polarizační závislost vůbec, což za předpokladu stálé nábojové anizotropie můžeme přisoudit samotnému vlivu tvaru defektu. Celkové výsledky měření tedy ukázaly, že stupeň polarizace luminiscenčního záření v oblasti mikropraskliny na dané sadě vzorků se pohyboval v rozmezí od 0 až 0,65.

7 Závěr

Předkládaná dizertační práce pojednává o luminiscenční diagnostice fotovoltaických článků. Metoda elektroluminiscence patří mezi nejpoužívanější luminiscenční metody detekce defektů, jejíž modifikace se používají napříč průmyslem, zvláště pak polovodičovým. Stěžejní oblastí výzkumu této práce byla nedestruktivní analýza vyzařovaného infračerveného záření monokrystalických a polykrystalických solárních článků různě modifikovanou detekční metodou elektroluminiscence a vlastní inovativní přínos v podobě užití mikroskopické a polarizační luminiscenční metodiky pro charakterizaci defektů solárních článků.

Práce je přehledně členěna do dvanácti kapitol, jenž můžeme obecně rozdělit na teoretickou a praktickou část. V teoretické části práce byly popsány nejdůležitější vlastnosti solárního článku, jakožto velkoplošného polovodičového prvku a základní stavební jednotky fotovoltaiky. Popsány byly fyzikální vlastnosti PN přechodu, typy solárních článků, elektrické parametry, základní typy defektů a souhrn diagnostických metod, v němž byla hlavní pozornost věnována právě luminiscenční diagnostice.

V praktické části této práce byly analyzovány monokrystalické a polykrystalické křemíkové články vyrobené firmou Solartec s. r. o. sídlící v Rožnově pod Radhoštěm, v rámci mé spolupráce na výzkumu difúze fosforu pro realizaci emitoru na p-typovém krystalickém solárním článku. Výstupy tohoto výzkumu byly publikovány autorem projektu v uznávaných elektrotechnických časopisech Elektrotechnika (Výzkum difúze fosforu pro realizaci emitoru na p-typovém krystalickém křemíkovém solárním článku) a ElectroScope (Vývoj emitoru dotovaného fosforem pro levnější a účinnější krystalické křemíkové solární články). Větší pozornost byla v práci věnována polykrystalickým článkům. Polykřemík jako výchozí surovina je levnější a i přes o něco horší elektrické vlastnosti, jenž způsobují hranice zrn zvyšující ztráty rekombinací, má významně vyšší výzkumný potenciál pro budoucí uplatnění.

Na začátku praktické části byly solární články, jakožto vstupní diagnostický materiál, popsány z hlediska elektrických parametrů. Tato data byla srovnána s makropohledem standardní elektroluminiscenční metody. U polykrystalických článků byla pro reprezentativní skupinu vzorků potvrzena předpokládaná, téměř lineární závislost účinnosti na intenzitě jasu luminiscence. Články s vyšším procentuálním zastoupením bezdefektní plochy, tedy plochy s vyšší proudovou hustotou, mají vyšší účinnost.

V další podkapitole praktické části byly analyzovány vybrané vzorky mikroskopickou metodou elektroluminiscence. Tato metoda se především používá k diagnostice vad integrovaných obvodů a je známá pod názvem PEM (Photon Emission Microscopy). Nepoužívá se standardně v diagnostice solárních článků, o čemž svědčí i minimum publikací v této oblasti. V průběhu této části byl analyzován a kvalitativně hodnocen přínos efektu

zvětšení při zobrazení lokální emise v mikroploše článku. Ukázalo se, že analýza mikroskopickou metodou elektroluminiscence přináší zpřesňující informaci v kvalitativním hodnocení defektivy. Mikrodefekty lokalizované metodou mikroskopické elektroluminiscence nebyly standardními metodami EL a MP lokalizovány. Faktor zvětšení zobrazení lokální emise v mikroploše článku tedy přináší benefit ovšem na laboratorní úrovni na úkor časové náročnosti.

V dalším průběhu praktické části byla rozšířena standardní metoda elektroluminiscence o polarizační analýzu. Luminiscenční polarizační efekt byl předpokládán ve vztahu k nábojové anizotropii defektu mikropraskliny, jenž byl ve velmi zjednodušené formě uvažován jako čárová porucha krystalografické mřížky. Mikropraskliny byly detekovatelné na bandgap luminiscenční úrovni, za pomoci CCD kamery. Spektrální odezva CCD detektoru se pohybovala přibližně okolo 300 až 1100 nm. U prezentovaného metodického postupu byla při opakovaných měřeních dosažena maximální míra polarizace 0,65. Díky úpravě měřicího pracoviště přidáním polarizačního analyzátoru jsme tedy v našem výzkumu mohli pozorovat částečně lineárně polarizovanou bandgap luminiscenci v oblasti mikropraskliny polykrystalického solárního článku. Bylo nutné konstatovat, že pozorovaná sinusoidní závislost částečně polarizovaného luminiscenčního záření se u všech mikroprasklin lišila rozdílným stupněm polarizace, který se pohyboval v rozmezí od 0 až 0,65. U některých vzorků, respektive mikroprasklin, nebyla pozorována lineární závislost vůbec. Za předpokladu stále nábojové anizotropie to může být přisouzeno samotnému tvaru defektu. Polarizační metoda v laboratorních podmínkách je časově náročná, a jak se ukázalo i do jisté míry nepřesná. Časová náročnost vyplývá z počtu měření, kdy jen v rámci demonstračních vzorků, bylo provedeno přes dvě stě měření plynoucích z otáčení polarizačního analyzátoru a opakování měření.

Poznatky polarizační analýzy byly publikovány například na největší fotovoltaické evropské konferenci – EU PVSEC (*Polarization Phenomenon Related to Luminescence of Silicon Solar Cell*) nebo na světově uznávané vědecké konferenci SPIE (*Luminescence radiation spectroscopy of silicon solar cells*).

Na základě výše uvedených poznatků můžeme konstatovat, že hlavní cíle předkládané dizertační práce byly splněny.

Vedle technické roviny v oblasti detekce defektů v polovodičích bych rád v závěru této práce zhodnotil a konstatoval i životní přínos z pohledu studia polovodičů na VUT v Brně. Díky znalostem nabytým právě při studiu polovodičů, ať už v rámci magisterského nebo doktorského studia a díky zkušenostem při zpracování nejen této dizertační práce jsem dostal příležitost pracovat ve svém oboru pro společnost ON Semiconductor s.r.o, patřící ke světové špičce výrobců polovodičových součástek. Z pohledu životní zkušenosti si této příležitosti vážím a беру jí jako ocenění mé práce a splnění cílů studia.

8 Doporučení pro další výzkum

Již v úvodu praktické části byly zmíněny hlavní požadavky výrobců solárních článků, kteří kladou důraz na nízkou cenu a vysokou účinnost solárních článků. Správná identifikace defektů solárních článků je jednou z cest pro kvalitnější výrobu. Bylo také uvedeno, že mezi trendy a kritéria pro výběr diagnostických metod dnešních výrobců patří zejména hloubka informace a kvalitativní přínos výsledků, rychlost identifikace defektů, jednoduchost, možnost automatizace většiny kroků, destruktivita metody a opakovatelnost.

Kritéria a trendy výběru diagnostických metod výrobců solárních článků pro rozšířené metody elektroluminiscence představené v této práci, tzn. mikroskopická metoda elektroluminiscence a inovovaná metoda využívající efekt polarizace luminiscenčního záření jsou shrnuty v tab. 8 níže.

Tab. 8: Kritéria a trendy výběru diagnostických metod výrobců solárních článků

<i>Kritérium metody</i>	<i>PEM</i>	<i>PA elektroluminiscence</i>
Kvalitativní přínos	✓	✓
Rychlost	x	x
Jednoduchost	x	x
Automatizace	x	x
Nedestruktivita	✓	✓
Opakovatelnost	✓	✓

Je zřejmé, že uvedené metody splňují požadavky v rámci kvalitativního přínosu, nedestruktivity a možnosti opakovatelnosti měření. Naopak tyto metody nesplňují požadavky v oblasti rychlosti, jednoduchosti a automatizaci jednotlivých kroků.

Na základě výše uvedených poznatků a dosažených výsledků v rámci této práce je doporučeno pro další výzkum v oblasti nedestruktivní analýzy luminiscenčního záření se zaměřit na možnost automatizace jednotlivých kroků uvedených metod a celkového sestavení pracoviště pro využití přímo ve výrobě. Dále pak rozšířit modifikované aplikace na metodu fotoluminiscence, u níž odpadá nutnost kontaktovat solární článek, což je výhodou při in-procesní kontrole. V dalším pokračování výzkumu by bylo vhodné metodiku popsanych analýz aplikovat za použití citlivějšího CCD detektoru (např. InGaAs) pro získání nových informací o struktuře na základě sub-bangap luminiscence.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] NEVODNICHEVA, Yulia. *Hrozí světovému hospodářství další ropný šok?*. FMV VŠE Praha, 2006. Dostupné také z: http://isis.vse.cz/zp/portal_zp.pl?podrobnosti=38491. Bakalářská práce. VŠE Praha.
- [2] MAJER, Jan. *ZDROJE ENERGIE A JEJÍ SPOTŘEBA*. BRNO, 2014. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace>. Bakalářská práce. VUT Brno Fakulta Strojního inženýrství.
- [3] *Czech RE Agency - Fotovoltaika pro každého* [online]. © 2003 [cit. 2014-06-12]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [4] BECHNÍK, Bronislav. Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, méně rozšířené technologie. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2014-06-12]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>
- [5] Společnost Trina Solar oznámila nový rekord účinnosti monokrystalických solárních článků IBC ve výši 24,13 %. *ČTK* [online]. 2018 [cit. 2018-04-18]. ISSN 1213-5003. Dostupné z: <http://www.ceskenoviny.cz/pr/zpravy/spolecnost-trina-solar-oznamila-novy-rekord-ucinnosti-monokrystalickych-solarnich-clanku-ibc-ve-vysi-24-13-/1481823>
- [6] MASSON, Gaëtan, Sinead ORLANDI a Manoël REKINGER. *GLOBAL MARKET OUTLOOK: For Photovoltaics 2014-2018*. In: *EPIA – the European Photovoltaic Industry Association* [online]. 2014 [cit. 3.3.2014]. Dostupné z: <http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018>
- [7] WATSON, James a Michael SCHMELA. *GLOBAL MARKET OUTLOOK: For Solar Power 2017-2021* [online]. In: . 2017, s. 60 [cit. 2018-04-18].
- [8] Často kladené otázky o fotovoltaike | MY DVA Group a.s. *SOLAR ENERGY* [online]. © 2009 [cit. 2014-06-13]. Dostupné z: <http://www.solarni-system.cz/fotovoltaika/casto-kladene-otazky-o-fotovoltaice>
- [9] WÜRFEL, Peter a Uli WÜRFEL. *Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts*. 2nd, updated and expanded ed. Weinheim: Wiley-VCH, c2009, xii, 244 p.
- [10] TVRDY, Kevin. *ELECTRON TRANSFER REACTIONS IN QUANTUM DOT SENSITIZED SOLAR CELLS*. Notre Dame, Indiana, 2011, s. 171. Doctor of Philosophy. University of Notre Dame.
- [11] GJESSING, Jo. *Photonic crystals for light trapping in solar cells* [online]. University of Oslo, 2011 [cit. 2014-07-04]. Dostupné z: http://www.mn.uio.no/fysikk/english/people/aca/aas/theses/JoGjessing_PhD_thesis_final16feb2012.pdf. Degree of Philosophiae Doctor. University of Oslo.
- [12] Principles of Photovoltaics, Photovoltaic Materials | Solar Energy. *Green Rhino Energy* [online]. 2013 [cit. 2014-07-04]. Dostupné z: http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_cells.php
- [13] *SiTec GmbH - Technology and Engineering Packages for Polysilicon, Ingot and Wafer Production: centrotherm photovoltaics - Products & Services - Solar Cell & Module - Technology - Selective Emitter Technology* [online]. © 1998-2013 [cit. 3.2.2014].

- Dostupné z: <http://p195894.mittwaldserver.info/en/products-services/solar-cell-module/technology/selective-emitter-technology.html#top>
- [14] KUSALA, Jaroslav. SOLÁRNÍ ENERGIE. *Miniencyklopedie solární energie* [online]. 2006 [cit. 2014-06-13]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
 - [15] VANĚK, Jiří, Petr KŘIVÍK a Vítězslav NOVÁK. *Alternativní zdroje energie*. Brno, 2006, s. 159. Skripta. FEKT Vysokého učení technického v Brně.
 - [16] HLADÍK, Jiří. *Analýza a optimalizace selektivních technologických procesů pro kontakty krystalických křemíkových solárních článků*. Brno, 2013. Dizertační práce. VUT Brno.
 - [17] SZE, S a Kwok NG. *Physics of semiconductor devices*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007, x, 815 s. ISBN 978-0-471-14323-9.
 - [18] FRANK, Helmar. *Fyzika a technika polovodičů: celost. vysokošk. učebnice pro vys. školy techn., stud. obor*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 283 s. ISBN 80-030-0401-2.
 - [19] JANDOVÁ, KRYSTÝNA. *Diagnosticke metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008, 91 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
 - [20] HÉGR, Ondřej. *Charakterizace nanostruktur deponovaných vysokofrekvenčním magnetronovým naprašováním*. BRNO, 2008, 127 s. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. JAROSLAV BOUŠEK, CSc.
 - [21] VANĚK, Jiří, Petr KŘIVÍK a Vítězslav NOVÁK. *Alternativní zdroje energie*. Brno, 2006, 159 s. Skripta. FEKT Vysokého učení technického v Brně.
 - [22] Principles of Photovoltaics, Photovoltaic Materials | Solar Energy. *Green Rhino Energy* [online]. 2013 [cit. 2014-07-04]. Dostupné z: http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_cells.php
 - [23] PVEDUCATION: *Solar Cell Structure* [online]. 2000 [cit. 2014-06-13]. Dostupné z: pvcadrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure
 - [24] MOLINA, Maria. *Crack Analysis in Silicon Solar Cells*. -, 2012, 84 s. Graduate Theses and Dissertations. University of South Florida.
 - [25] KÖNTGES, M. Reviewing the practicality and utility of electroluminescence and thermography images. In: *NREL - National Renewable Energy Laboratory* [online]. Washington, D.C.: -, 2014 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/2014_pvmrw_33_kontges.pdf
 - [26] FRANTÍK, Ondřej, Pavel ČECH, Jiří PITRUŇ, Aleš PORUBA a Stojan RADEK. SOLARTEC. Výzkum difúze fosforu pro realizaci emitru na p-typovém krystalickém křemíkovém solárním článku. *Elektrorevue* [online]. 2014, **16**(1), 5 [cit. 2014-06-14]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie>
 - [27] DEMANT, M., M. OSWALD, S. NOLD, S. BARTSCH, S. SCHOENFELDER a S. REIN. Micro-Cracks in Silicon Wafers and Solar Cells: Detection and Rating of Mechanical Strength and Electrical Quality. In: *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Amsterdam: -, 2014, s. 390 - 396. ISBN 3-936338-34-5. ISSN -.

- [28] SOLARTEC S.R.O. *PV test - diagnostická laboratoř* [online]. 2014 [cit. 2014-07-18]. Dostupné z: <http://www.solartec.cz/rozsahle-instalace/provozovani-fve-elektren/pv-test-diagnosticka-laborator>
- [29] VANĚK, Jiří. *Diagnostické metody fotovoltaiických článků založené na generačně-rekombinačních jevech: Diagnostic methods of photovoltaic cells based on generation-recombination effects : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTUM, 2008, 32 s. Habilitační práce. VUT Brno.
- [30] Photon emission microscopy. *Electrical Failure Analysis Laboratory: ON Semiconductor Piešťany* [online]. Piešťany: -, 2007 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.vvku.eu/cv/efa/background.html>
- [31] TESCAN PERFORMANCE IN NANOSPACE. *TESCAN* [online]. BRNO: TESCAN, 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/>
- [32] REIMER, Ludwig. *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*. -. Berlin: Springer-Verlag, 1985. ISBN 978-3-662-13562-4.
- [33] PAVLÍK, STANISLAV. *TESTER FOTOVOLTAICKÝ CH ČLÁNKŮ A PANELŮ*. BRNO, 2014. SEMESTRALNÍ PRÁCE. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [34] POKORNÝ, PAVEL. *SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE A JEJÍ APLIKACE*. BRNO, 2010. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. MARTIN LOŠŤÁK.
- [35] Nikon | Industrial Metrology | Support. *NIKON* [online]. -: Nikon Corporation, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/>
- [36] PELANT, Ivan a Ivan PELANT. *Luminiscenční spektroskopie: I. Objemové krystalické polovodiče*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2006, 328 s.
- [37] DIAN, JURAJ a IVAN JELÍNEK. VIDITELNÁ FOTOLUMINISCENCE MATERIÁLŮ NA BÁZI KŘEMÍKU. In: *Chemické listy* [online]. 104. Praha: Česká společnost chemická, 2010 [cit. 2014-07-17]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_08_770-777.pdf
- [38] FOX, Mark. *Optical properties of solids*. First published 2001. Oxford: Oxford University Press, 2001, xii, 305 s.
- [39] JAN, Voveš. ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA ČVUT V PRAZE. *Elektronika polovodičů: Interakce záření s polovodičem* [online]. 2004 [cit. 2014]. Dostupné z: http://www.micro.feld.cvut.cz/home/34epo/prednasky/opt_bezo.pdf
- [40] FUYUKI, Takashi, Hayato KONDO, Tsutomu YAMAZAKI, Yu TAKAHASHI a Yukiharu URAOKA. Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence. *Appl. Phys. Lett.* [online]. American Institute of Physics., 2005, **86**(26), - [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.1978979>
- [41] DRECKSCHMIDT, F. SUB-BANDGAP ELECTROLUMINESCENCE AT ROOM TEMPERATURE OF EXTENDED DEFECTS IN MULTICRYSTALLINE SILICON. In: *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* [online]. Valencia: -, 2008, s. 407 -410 [cit. 2018-05-22]. ISBN 3-936338-24-8. ISSN -.
- [42] KLIGER, David, James LEWIS a Cora RANDALL. *Polarized Light in Optics and Spectroscopy*. San Diego: Academic Press, 1990, 304 s. ISBN 01-241-4975-8.

- [43] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2008, 361 s. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [44] STOJAN, Radek. Detekce defektů fotovoltaických článků pomocí luminiscenčních metod. *ENERGETIKA: Odborný měsíčník pro elektrárny, teplárny a použití energie*. 2013, (63), 431-434. DOI: 0375-8842.
- [45] FUYUKI, Takashi a Ayumi TANI. Photographic Diagnosis of Crystalline Silicone Solar Cells by Electroluminescence. *Experimental and Applied Mechanics: Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics (Google eBook)* [online]. 2011, (6), 159-162 [cit. 2014-07-18]. Dostupné z: http://books.google.cz/books/about/Experimental_and_Applied_Mechanics_Volum.html
- [46] KOKTAVÝ, P. a J. ŠIKULA. Reverse Biased P-N Junction Noise in GaAsP Diodes with Avalanche Breakdown Induced Microplasmas. *Fluctuation and Noise Letters* [online]. 2002, **02**(02), 65-70 [cit. 2018-05-15]. ISSN 0219-4775. Dostupné z: <https://doi.org/10.1142/S0219477502000622>
- [47] DOLENSKÝ, Jan. *DIAGNOSTICKÉ METODY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ VYUŽÍVAJÍCÍ LOKÁLNÍ EMISI SVĚTLA*. BRNO, 2014. DOKTORSKÁ PRÁCE. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [48] Introduction to Charge-Coupled Devices (CCDs). *YSC Technologies* [online]. Fremont: -, 2017 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.ysctech.com/digital-microscope-CCD-camera-info.html>
- [49] Back-thinned type CCD area image sensor S7170-0909. *Hamamatsu Photonics* [online]. JAPAN: -, 2017 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/3100/4005/4206/4123/S7170-0909/index.html>
- [50] *MORAVSKÉ PŘÍSTROJE A.S. CCD kamery pro astronomii* [online]. Zlín: -, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.gxccd.com/>
- [51] FRANTÍK, O., P. ČECH, A. PORUBA, R. BAŘINKA, R. STOJAN a I. SZENDIUCH. Vývoj emitru dotovaného fosforem pro levnější a účinnější krystalické křemíkové solární články. *ElectroScope* [online]. 2014, **2014**(1), 3 [cit. 2018-05-16]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/index.php?option=com_content&view=section&id=14&Itemid=52
- [52] FRANTÍK, Ondřej. *Vysokoteplotní procesy ve výrobě křemíkových fotovoltaických článků*. Brno, 2014, 129 s. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [53] EFFECT OF WAFER THICKNESS ON THE PERFORMANCE OF mc-Si SOLAR CELLS. In: HAHN, Giso, Christian HAESSLER a Martin LANGENKAMP. *17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Oct 22, 2001 - Oct 26, 2001*,. München: -, 2001, s. -. ISBN 3-936338-07-8. ISSN -.
- [54] DOLENSKÝ, Jan, Aleš VESELÝ, Jiří VANĚK a Jan HROZEK. Diagnostic methods of solar cells in dependence on temperature. *Proceedings of SPIE* [online]. 2009, **2009**(7412), 8 [cit. 2018-05-28]. ISSN 0277- 786X. Dostupné z: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.826135>

- [55] STOJAN, Radek. *Zařízení pro kontrolu velmi nízkých teplot při detekci defektů solárních článků*. Brno, 2010, 51 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [56] JAKSCH, Ivan. *Základy digitálního obrazu. Vektorová a rastrová grafika*. Liberec, 2012. Učební text. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.
- [57] REICHE, Manfred a Martin KITTLE, Sukumar BASU, ed. INTECH. *Structure and Properties of Dislocations in Silicon: Crystalline Silicon - Properties and Uses*. -: InTech, 2011, 344 s. ISBN 978-953-307-587-7. Dostupné také z: http://cdn.intechopen.com/pdfs/17724/InTechStructure_and_properties_of_dislocations_in_silicon.pdf
- [58] WOO, Soobin, Mariana BERTONI, Kwangmin CHOI, Seungjin NAM, Sergio CASTELLANOS, Douglas POWELL, Tonio BUONASSISI a Hyunjoo CHOI. An insight into dislocation density reduction in multicrystalline silicon. *Solar Energy Materials & Solar Cells* [online]. 2016, **2016**(155), 13 [cit. 2018-05-30]. Dostupné z: <https://erg.berkeley.edu/wp-content/uploads/2016/07/scastellanos2016-2.pdf>
- [59] PELOSO, Matthew. *ADVANCED LUMINESCENCE-BASED CHARACTERIZATION OF SILICON WAFER SOLAR CELLS*. Singapore, 2012, 213 s. -. National University of Singapore, DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING.
- [60] OSTAPENKO, S., I. TARASOV, J.P. KALEJS, C. HAESSLER a E-U. REISNER. Defect monitoring using scanning photoluminescence spectroscopy in multicrystalline silicon wafers. *Semiconductor Science and Technology* [online]. 2000, **15**(8), 840-848, 840-848 s. [cit. 2018-05-30]. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000SeScT..15..840O>
- [61] POTTHOFF, Torben, Karsten BOTHE, Ulrich EITNER a Marc KÖNTGES. Detection of the voltage distribution in photovoltaic. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2010, **18**(-), 100-106, 100-106 s. [cit. 2018-06-03]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pip.941>

10 Seznam použitých obrázků, tabulek, symbolů a zkratk

10.1 Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Hubbertova teorie ropného vrcholu v USA [2].....	11
Obr. 2: Vývoj globální instalované fotovoltaické kapacity od roku 2000 do roku 2013 [6] ..	13
Obr. 3: Predikce vývoje instalované kapacity pro EVROPU až do roku 2018 [6]	14
Obr. 4: Energetický diagram absorbce fotonu a vytvoření páru elektron-díra v křemíku [10]	15
Obr. 5: Spektrum slunečního záření a spektrální citlivost křemíkového solárního článku s vyznačenou hodnotou bandgap energie pro křemík [11]	16
Obr. 6: Závislost vlnové délky a energie fotonu	16
Obr. 7: Solární článek a jeho struktura [13]	17
Obr. 8: Základní postup výroby monokrystalického solárního článku [16].....	18
Obr. 9: Pásový diagram hustoty stavů a) intrinického , b) N-typu a c) P-typu polovodiče v teplotní rovnováze ($pn=n_i^2$ pro všechny tři typy) [17]	20
Obr. 10: Přímá (zářivá), Augerova a SRH rekombinace.....	22
Obr. 11: Ideální náhradní model solárního článku při osvětlení [17]	23
Obr. 12: Modelová VA charakteristika solárního článku [22]	24
Obr. 13: Rozdělení solárních článků dle použitého materiálu [14], [3]	26
Obr. 14: Hranice zrnitosti v poly-Si [23]	27
Obr. 15: Vírový defekt (vlevo) a vnitřní pnutí křemíkového článku (vpravo, [19]) zobrazeny metodou EL.....	28
Obr. 16: Standardní EL (a), Sub-bandgap luminescence s dislokacemi (b) [25], zrna v poly-Si (c).....	29
Obr. 17: Nehomogenita vrstevového odporu difúzní vrstvy zobrazena metodou EL.....	29
Obr. 18: Detail poškrábání solárního článku (vlevo) a porucha kontaktů (vpravo).....	30
Obr. 19: Zhmožděná hrana SC pozorována metodou mikroplazmy a mikroprasklina	30
Obr. 20: Lokální zkraty (local shunts), metoda luminiscence mikroplazmy	31
Obr. 21: Typické mikropraskliny pozorované při vlastním výzkumu	31
Obr. 22: Typický snímek polykrystalického solárního článku metodou LBIC [29].....	33

Obr. 23: Principiální schéma metody EBIC [32]	33
Obr. 24: Typický snímek celého solárního panelu termo-kamerou [28].....	34
Obr. 25: NIKON ECLIPSE L200N [35]	35
Obr. 26: Pracoviště elektronové mikroskopie Tescan Fera 3	35
Obr. 27: E-k diagram přímého (vlevo) a nepřímého (vpravo) polovodiče [38]	38
Obr. 28: Spektrum luminiscenčního záření křemíkového solárního článku [41].....	39
Obr. 29: Spektrální citlivost CCD kamery a intenzita luminiscence křemíku [45]	43
Obr. 30: Příklad časového průběhu mikroplasmatického šumu a) dvoj-stavového, b) více-stavového [29].....	44
Obr. 31: Základní sestava měřícího pracoviště metody elektroluminiscence	45
Obr. 32: Základní sestava měřícího pracoviště metody luminiscenční mikroskopie.....	45
Obr. 33: Struktura základního elementu CCD čipu- MOS kapacitor [48]	47
Obr. 34: CCD kamera model G2-3200 (a) s 3,2 MPx snímačem OnSemi KAF-3200ME (b).....	48
Obr. 35: CCD kamera model C4880-21 se snímačem Hamamatsu S7170 [49]	48
Obr. 36: QE CCD snímače OnSemi KAF-3200ME (vlevo) a Hamamatsu S7170 (vpravo) [50], [49].....	49
Obr. 37: A - Prometrix RS35 pro měření vrstevového odporu; B – čtyřbodová hlava; C– základna pro wafer	51
Obr. 38: Mapy vrstevových odporů emitoru vzorků uvedených v tab. 3 (vyhodnoceno v programu JMP)	52
Obr. 39: Graf závislosti účinnosti E_{EF} a I_{SC} na tloušťce substrátu	53
Obr. 40: Graf závislosti účinnosti E_{EF} na zkratovém proudu I_{SC}	54
Obr. 41: Electroluminiscence mono-Si článků za podmínek $I=1,9A$ a $U=1,1V$	54
Obr. 42: Testovací snímky pro algoritmus výpočtu intenzity EL v programu Matlab ($A = 0\%$, $B = 100\%$).....	55
Obr. 43: SEM analýza povrchu mono a poly Si solárního článku	56
Obr. 44: Graf závislosti účinnosti (E_{EF}) a výkonu (P_m) na zkratovém proudu (I_{SC})	57
Obr. 45: Graf závislosti účinnosti (E_{EF}) a Intenzity EL (I_{EL}) na zkratovém proudu (I_{SC})	58
Obr. 46: Binární interpretace výsledků metody EL pro vzorky z tab. 3 ($I = 1,9A$; $U = 1,2V$).....	59

Obr. 47: ECT pro kontrolu teplotních podmínek při měření EL	60
Obr. 48: Výsledky měření metodou MP pro vzorky z tab. 4 ($I = 0,35A$; $U = 13,1V$)	60
Obr. 49: Modifikované metody standardní elektroluminiscence	61
Obr. 50: PEM měřící pracoviště	62
Obr. 51: Úlomek solárního článku (wfr 14, viz tab. 3) nakontaktován na základně pracoviště PEM	63
Obr. 52: Mitutoyo NIR objektiv a jeho spektrální propustnost	64
Obr. 53: EL poly-si (wfr 11, viz tab. 4) při $I = 2A$ a $U = 1,3V$. Snímek A – optická lokalizace oblasti. B -standardní objektiv a C - NIR objektiv.	64
Obr. 54: Metoda MP (snímek A) a EL (snímky B a C) pro mono-Si (wfr 14, viz tab. 3). Oblast D vyznačena pro analýzu PEM.	65
Obr. 55: Metoda PEM v režimu MP (snímek D1) a EL (snímek D2)	65
Obr. 56: SEM (A) a EBIC (B) analýza mikrorýhy u mono-Si článku (wfr 14, viz tab. 3)	66
Obr. 57: Graf závislost účinnosti a počtu defektů na zkratovém proudu (pro vzorky v tab. 3)	66
Obr. 58: MP na hraně polykrystalického článku (wfr 8, viz tab. 4) při $I = 0.37A$ a $U = 1,3V$. Snímek A – standardní MP., B – PEM v režimu MP čeveně vyznačené oblasti a C – klasická optika	67
Obr. 59: A- metoda EL poly-Si článek č. 8; B – defekt prasklinového typu; C- optická mikroskopie zrna poly-Si; D – metoda PEM v režimu EL; F- metoda PEM v režimu MP	68
Obr. 60: Hranice zrn polykrystalického článku; A- optická mikroskopie zrna; B – metoda PEM v režimu EL; C – metoda PEM v režimu MP	68
Obr. 61: Modifikovaná sestava měřícího pracoviště metody elektroluminiscence	70
Obr. 62: Závislost doby expozice CCD kamery na úrovni jasu elektroluminiscenčního snímku	71
Obr. 63: Výsledky standardní metody EL ($I = 1,9A$; $U = 1,2V$)	72
Obr. 64: Vertikální profil intenzity zářivé rekombinace pro solární článek č.12	72
Obr. 65: Luminiscence plochy (wafer 12) - grayscale (nahore) a Matlab JET mapa (dole) ...	73
Obr. 66: Změna intenzity luminiscence vertikálního profilu v závislosti na úhlu pootočení PA vzorku č. 12 v daném bodě	76

Obr. 67: Změna intenzity luminiscence ve vertikálním profilu v závislosti na úhlu pootočení PA vzorku č. 12	77
Obr. 68: Opakovaná měření polarizační analýzy u vzorku č.12 (data zpracována v programu JMP).....	77
Obr. 69: Opakovaná elektroluminiscenční měření se změnou polohy PA u vzorku č.4.....	78
Obr. 70: Matlab JET mapa luminiscence celé plochy solárního článku č. 8 (A) a detail mikropraskliny (B).....	79
Obr. 71: Šikmý profilový řez luminiscence článku č. 8. Vzdálenost podél profilu od shora dolů.	79
Obr. 72: Změna intenzity luminiscence v bodě I_{EL} (903; 837) profilu v závislosti na úhlu pootočení PA vzorku č. 8.....	80

10.2 Seznam použitých tabulek

Tab. 1: CCD KAF-3200ME a Hamamatsu S7170	49
Tab. 2: Vrstvový odpor vybraných mono-Si článků	51
Tab. 3: VA charakteristiky čtyř vybraných reprezentativních vzorků mono-Si.....	53
Tab. 4: VA charakteristiky čtyř vybraných reprezentativních vzorků poly-Si.....	57
Tab. 5: VA nastavení pro měřené vzorky metodou PEM v režimu EL a MP	63
Tab. 6: Opakovaná měření polarizační analýzy u vzorku č.12.....	81
Tab. 7: Celkové výsledky měření stupně polarizace na sadě (25 článků) poly-Si článků.....	81
Tab. 8: Kritéria a trendy vývěru diagnostických metod výrobců solárních článků.....	84

10.3 Seznam použitých symbolů, zkratek a odborných výrazů

SC	solární článek (solar cell)
wafer	v polovodičovém průmyslu používaný termín pro křemíkovou desku, v této práci tedy solární článek
poly-Si	polykrystalický křemík
mono-Si	monokrystalický křemík
GW	gigawat

eV	elektronvolt
EPIA	Evropská fotovoltaická průmyslová asociace
AM1.5	jeden a půl násobně mohutnější vrstva vzduchu než AM0 při výšce Slunce přibližně 45° nad obzorem
UV	ultrafialové záření
IR	infračervené záření
P-N	polovodičový p-n přechod
N-typ	příměsový polovodič s elektrony jako majoritními nosiči náboje (záporný)
P-typ	příměsový polovodič s děrami jako majoritními nosiči náboje (kladný)
EL	Diagnostická metoda Elektroluminiscence
PL	Diagnostická metoda Fotoluminiscence (Photoluminescence)
MP	Diagnostická metoda pozorování Mikroplazmy
R	rekombinace nosičů náboje
G	generace nosičů náboje
LBIC	Light Beam Induced Current
LBIV	Light Beam Induced Voltage
EBIC	Electron Beam Induced Voltage
ILIT	IR Thermography
POCl ₃	chlorid fosforitý
KOH	Hydroxid draselný
BSF	Back Side Field
Al	hliník
Ag	stříbro
E _F	Fermiho hladina
E _c	Vodivostní energetický pás
E _v	Valenční energetický pás

E-k diagram	diagram ukazuje vztah mezi energií a hybností dostupných kvantových mechanických stavů pro elektrony v materiálu
w	tloušťka článku
B	materiálová konstanta, viz rovnice (20)
B	spektrum záření, viz rovnice (17)
U_{rad}	celkový rozsah rekombinace
dz	uvažovaná délka válce jednotkového průřezu fotonového toku
n_i	koncentrace vlastních nosičů
p	koncentrace volných děr a n koncentrace volných elektronů
k	Boltzmanova konstanta
h	Plackova konstanta
f	frekvence vlnění
c	rychlost světla
T	teplota
SEM	spektrální elektronový mikroskop (scanning electron microscope)
FIB	fokusovaný iontový svazek (focused ion beam)
λ_{ex}	vlnová délka budícího záření u metody fotoluminescence
CCD	nábojově vázané prvky (Charge Coupled Devices)
QE	kvantová účinnost (quantum efficiency)
SiO ₂	oxid křemičitý
MOS	Metal Oxid Semiconductor
μm	mikrometr
PEM	Photon Emission Microscopy
NIR	blízké infračervené záření
VA	voltampérová charakteristika
PA	Polarizační analyzátor
FA	Failure analysis (analýza selhání)
NDT	Nondestructive testing (nedestruktivní testování)

I_{EL}	Intenzita luminiscenčního záření
I_{450}	proud při napětí 450 mV
I_{SC}	zkratový proud solárního článku
U_{OC}	napětí naprázdno (open circuit voltage)
I_m	měřený proud solárního článku
U_m	měřené napětí solárního článku
P_m	měřený výkon solárního článku
FF	faktor „plnění“ výkonu Fill Factor
E_{EF}	Účinnost solárního článku
R_{SO}	sériový odpor R_{SO} solárního článku
R_{SH}	paralelní odpor solárního článku
ECT	zařízení pro kontrolu velmi nízkých teplot (equipment for control very low temperatures) při měření metodou elektroluminiscence
R_{sh}	vrstvý odpor (sheet resistance)
MATLAB	interaktivní programové prostředí pro analýzu dat
Bandgap	energie zakázaného pásu (pro křemíku 1,12 eV)
SIMS	ovládací program CCD kamery (Simple Image Manipulation System)
JMP	programová sada nástrojů pro statistickou analýzu dat

11 Publikace autora

STOJAN, R.; VANĚK, J. Luminescence Diagnostics of Photovoltaic Cells. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 2018, p. 1-4. ISSN: 2321-9653.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; CHOBOLA, Z.; FRANTÍK, O. Polarization Phenomenon Related to Luminescence of Silicon Solar Cell. In *EU PVSEC 2014 Proceedings. EU PVSEC 2014 Proceedings DVD*. Amsterdam, Netherlands.: WIP, 2014. p. 1191-1193. ISBN: 3-936338-34-5. ISSN: 2196-0992.

FRANTÍK, O.; ČECH, P.; PORUBA, A.; BAŘINKA, R.; STOJAN, R.; SZENDIUCH, I. Vývoj emitru dotovaného fosforem pro levnější a účinnější krystalické křemíkové solární články. *ElectroScope* - <http://www.electroscope.zcu.cz>, 2014, roč. 2014, č. 1, s. 06-08. ISSN: 1802-4564.

FRANTÍK, O.; ČECH, P.; BAŘINKA, R.; PORUBA, A.; STOJAN, R. Experimentální výroba bifaciálních solárních článků. In *Sborník příspěvků z NZEE 2014*. 2014. s. 25-28. ISBN: 978-80-02-02528-3.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; FRANTÍK, O. THEORY OF POLARIZATION PRINCIPLE BY LUMINESCENCE OF SOLAR CELL. In *35. Nekonvenční zdroje elektrické energie*. Blansko: Tribun EU s.r.o., 2014. p. 112-115. ISBN: 978-80-02-02528-3.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; FRANTÍK, O. Advanced polarization spectroscopy of luminescence emitted by solar cell. *International Journal of Research in Electrical & Electronics Technology*, 2014, vol. 1, no. 1, p. 9-11. ISSN: 2349-2074.

FRANTÍK, O.; ČECH, P.; PITRUN, J.; PORUBA, A.; STOJAN, R. Výzkum difúze fosforu pro realizaci emitru na p-typovém krystalickém křemíkovém solárním článku. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2014, roč. 16, č. 1, s. 43-47. ISSN: 1213-1539.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; MALÝ, M. Progression of Silicon Solar Cells Luminescence Diagnostic Methods. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2014, vol. 2, no. 1, p. 18-22. ISSN: 2332-3299.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; MALÝ, M.; FRANTÍK, O.; GVRITISHVILI, R.; ŠIMONOVÁ, L. CHARACTERISTICS OF LUMINESCENCE SOLAR CELLS RADIATION. In *Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Paris, France.: WIP, 2013. p. 1599-1601. ISBN: 3-936338-33-7.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; MALÝ, M.; GVRITISHVILI, R.; TOMÁNEK, P.; FRANTÍK, O. Luminescence radiation spectroscopy of silicon solar cells. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8825, no. 8825, p. 882529-882535. ISSN: 0277-786X.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; MALÝ, M.; GVRITISHVILI, R.; ŠIMONOVÁ, L.; FRANTÍK, O. Analysis of luminescence radiation interact by silicon defects. In *Advanced Batteries, Accumulators and Fuel Cells [ABAF 14th]*. 1. Brno: VUT v Brně, 2013. p. 124-126. ISBN: 978-80-214-4767-7.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; ŠIMONOVÁ, L.; VESELÝ, A.; FRANTÍK, O.; BAURA, T. Detekce defektů fotovoltaiických článků pomocí luminiscenčních metod. *Energetika*, 2013, roč. 63, č. 7, s. 431-434. ISSN: 0375-8842.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; GVRITISHVILI, R.; ŠIMONOVÁ, L.; FRANTÍK, O. Lineární polarizace luminiscenčního záření. In *34. Nekonvenční zdroje elektrické energie*. Blansko: Tribun EU s.r.o., 2013. s. 59-62. ISBN: 978-80-02-02458-3.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; MALÝ, M.; GVRITISHVILI, R.; ŠIMONOVÁ, L. Polarizace luminiscenčního záření solárních článků. 8. Česká fotovoltaiická konference, VUT v Brně: 2013.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; ŠIMONOVÁ, L.; VESELÝ, A.; FRANTÍK, O. Luminiscenční spektroskopie fotovoltaiických článků. In *33. Nekonvenční zdroje elektrické energie*. Hrotovice: Tribun EU s.r.o., 2012. s. 32-35. ISBN: 978-80-02-02372-2.

VESELÝ, A.; VANĚK, J.; STOJAN, R. Concentrator Photovoltaic Systems. *ECS Transactions*, 2012, vol. 40, no. 1, p. 161-166. ISSN: 1938-5862.

STOJAN, R.; BOBALÍK, L.; VANĚK, J.; DOLENSKÝ, J.; VESELÝ, A. Využití pyranometru při měření intenzity sluneční energie. In *ALER 2011*. Liptovský Mikuláš: UNIZA, 2011. s. 153-157. ISBN: 978-80-554-0242-0.

STOJAN, R.; VANĚK, J. Control equipment for very low temperature during the defect detection of solar. *ECS Transactions*, 2011, vol. 32, no. 1, p. 129-134. ISSN: 1938-5862.

VESELÝ, A.; VANĚK, J.; STOJAN, R. Concentrator Photovoltaic Systems. In *Proceeding of the ABAF-12 Meeting*. Brno, CZ: ABAF, 2011. p. 159-164. ISBN: 978-80-214-4357-0.

VESELÝ, A.; VANĚK, J.; DOLENSKÝ, J.; STOJAN, R.; PALLA, M. Pracoviště pro měření fotovolatických panelů v řízeném prostředí. In *32. Nekonvenční zdroje elektrické energie*. Hrotovice: Tribun EU s.r.o., 2011. s. 128-131. ISBN: 978-80-02-02323-4.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; BOBALÍK, L. Intensity of Solar Radiation Measuring by Pyranometer. In *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Hamburg, DE: WIP, 2011. p. 3783-3785. ISBN: 3-936338-27-2.

VESELÝ, A.; VANĚK, J.; STOJAN, R.; DOLENSKÝ, J.; BAŘINKA, R. Innovated Workplace for Measuring Photoluminescence at Very Low Temperature. In *Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Hamburg, DE: WIP, 2011. p. 1512-1515. ISBN: 3-936338-27-2.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; BOBALÍK, L.; VESELÝ, A.; DOLENSKÝ, J. Dlouhodobé monitorování intenzity slunečního záření ve fotovoltaice. In 32. *Nekonvenční zdroje elektrické energie*. Hrotovice: Tribun EU s.r.o., 2011. s. 128-131. ISBN: 978-80-02-02323-4.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; BOBALÍK, L. Measuring of Solar Radiation Intensity. In *Proceedings of 9th International Conference Vsacký Cáb 2011*. Tiskárna Atom, Ltd., Chuchelna 254, Semily: Brno University of Technology, 2011. p. 125-128. ISBN: 978-80-214-4319-8.

STOJAN, R.; VANĚK, J. Zařízení pro kontrolu velmi nízkých teplot při detekci defektů solárních článků. In *Elektrotechnika a informatika 2010 část druhá - Elektronika*. Plzeň: 2010. s. 121-124. ISBN: 978-80-7043-914-2.

STOJAN, R.; VANĚK, J. ZAŘÍZENÍ PRO KONTROLU VELMI NÍZKÝCH TEPLŮ PŘI DETEKCI DEFEKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ. In *ALTERNATIVNE ZDROJE ENERGIE*. Liptovský Mikuláš: 2010. s. 118-123. ISBN: 978-80-554-0242-0.

STOJAN, R.; VANĚK, J.; DOLENSKÝ, J. Control system for very low temperature during the defection detection of solar cells. *Electronics*, 2010, vol. 2010, no. 4, p. 16-18. ISSN: 1313-1842.

STOJAN, R.; VANĚK, J. System of very low temperature controlling during the defect detection of solar cells. In *Advanced Batteries, Accumulators and Fuel Cells*. Brno: Tribun EU s.r.o., 2010. p. 167-170. ISBN: 978-80-214-4148-4.

STOJAN, R.; VANĚK, J. Control equipment for very low temperature during the defect detection of solar cells. In *Electronic Devices and Systems*. První. Brno: NOVAPRESS s.r.o., 2010. p. 308-312. ISBN: 978-80-214-4138-5.

12 Životopis autora

:: Osobní údaje

Celé jméno: Ing. Radek Stojan
Adresa: Kunovice č. 18, 756 44, Česká republika
Telefon: +420 608 253 667
Email: r.stojan@seznam.cz
Státní příslušnost: česká
Datum narození: 13. 9. 1985
Pohlaví: muž



:: Vzdělání a odborná příprava

2010 – dosud Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Doktorské studium, obor Mikroelektronika a technologie, probíhá kombinovaná forma studia
2008 – 2010 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, obor Elektrotechnická výroba a management, ukončeno titulem Ing.
2005 – 2008 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, obor Mikroelektronika a technologie, ukončeno titulem Bc.
2001 – 2005 Gymnázium Františka Palackého Valašské Meziříčí, ukončeno maturitní zkouškou

:: Zaměstnání

2011 – dosud ON Semiconductor Czech Republic, s.r.o. Rožnov pod Radhoštěm. Pracovní pozice:

- *Metrolog* - zodpovědnost za systém metrologie
- *Diffusion Process Enginner* - zodpovědnost za měřicí systémy, RTP a VTR procesy na lokaci difuze
- *Project Leader* - zodpovědnost za vedení projektu pro zvyšování výtěžnosti technologie TIGBT

2011 – 2014 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Ústav elektrotechnologie.
Pracovní pozice: *Technicko-hospodářský pracovník.*

:: Zahraniční pracovní zkušenosti

2017 Niigata (Japonsko) – pracovní cesta v rámci projektu zvyšování výtěžnosti technologie TIGBT, ON Semiconductor Czech Republic, s.r.o.
2014 Amsterdam (Nizozemsko) – prezentace dosažených vědeckých výsledků v rámci 29. konference EU PVSEC(European Photovoltaic Solar Energy Conference), VUT Brno

2011	Hamburg (Německo) – prezentace dosažených vědeckých výsledků v rámci 26. konference EU PVSEC (European Photovoltaic Solar Energy Conference), VUT Brno		
:: Certifikáty a osvědčení			
2016	ON Semiconductor Lean Six Sigma Green Belt certifikát		
2009	Doplňující pedagogické studium pro učitele praktického vyučování a odborného výcviku na střední škole		
:: Výzkumná činnost			
2014 – 2016	Účast v řešení projektu „ <i>Materiály a technologie pro elektrotechniku II</i> “ na VUT v Brně		
2011 – 2014	Účast v řešení projektu „ <i>Materiály a technologie pro elektrotechniku I</i> “ na VUT v Brně		
2011	Účast v řešení projektu „ <i>Vliv proudové hustoty na spektrum záření elektroluminiscence solárního článku a jeho využití pro automatickou detekci defektů solárních článků</i> “ na VUT v Brně		
:: Publikační činnost			
2010 – 2018	Autorem a spolu-autorem dvaceti devíti odborných publikací v oblasti nedestruktivní diagnostiky křemíkových solárních článků		
:: Schopnosti, znalosti a dovednosti			
<i>Mateřský jazyk:</i>		čeština	
<i>Ostatní jazyky:</i>		angličtina,	němčina
čtení		středně pokročilý	začátečník
psaní		středně pokročilý	začátečník
slovem		středně pokročilý	začátečník
<i>Sociální schopnosti a dovednosti:</i>		komunikativnost, schopnost týmové práce, dobrá schopnost se adaptovat v novém prostředí	
<i>Počítačové znalosti a dovednosti:</i>		MS Windows, MS Office, JMP Software, Autocad, Solidworks, Eagle	
<i>Řidičské oprávnění:</i>		A, B	
<i>Další znalosti:</i>		SPC, MSA, 8D, FMEA a Six Sigma	
:: Zájmy a koníčky			
Rodina, fotbal, florbal, cyklistika, turistika...			