

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**Diplomová práce**

**Využití aktivní termografie pro testování fotovoltaických  
článků**

**Bc. Lukáš Muzika**

**Plzeň 2017**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš MUZIKA**  
Osobní číslo: **E14N0026P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Využití aktivní termografie pro testování fotovoltaických článků**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište základní principy, vlastnosti a metody testování fotovoltaických článků.
2. Popište stručně metody termografie, aktivní termografie pro testování materiálů a možnosti využití termografických metod pro fotovoltaické aplikace.
3. Zhodnoťte výhody a nevýhody různých možností testování fotovoltaických článků.
4. Pomocí vybraných standardních metod a metod na bázi aktivní termografie s různými způsoby buzení proveďte testování fotovoltaických článků.
5. Vyhodnoťte provedená měření a diskutujte použitelnost, výhody a nevýhody Vámi použitých metod pro testování FV článků.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. MEOLA, Carosena. *Infrared thermography: recent advances and future trends*. [Oak Park, Ill.: Bentham Science, 2012].
2. MEOLA, Carosena. *Recent advances in non-destructive inspection*. New York: Nova Science Publishers, 2010. *Materials science and technologies*.
3. VAVILOV, Vladimir. *Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends*. *Quantitative InfraRed. Thermography Journal*. 2014, 11(1), 66-83. DOI: 10.1080/17686733.2014.897016. ISSN 1768-6733.
4. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2014.897016>.
5. elektronické informační zdroje, katalogy, vědecké články.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Olga Tůmová, CSc.**

Katedra technologií a měření

Konzultant diplomové práce: **Ing. Michal Švantner, Ph.D.**


Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná práce se zabývá využitím aktivní termografie pro testování solárních článků. Práce popisuje základní rozdělení solárních článků, jejich vlastností, vad a metod výroby.

Hlavní část práce je o možnostech měření článků. Jsou popsány základní využívané metody jejich testování – především měření VA charakteristiky. Jsou popsány možnosti inspekce solárních článků pomocí aktivní termografie.

Jsou provedena měření VA charakteristiky a IRNDT měření (infračervené nedestruktivní testování) 6 palcových polykrystalických solárních článků se dvěma busbary (hlavními vodiči). Články jsou měřeny v původním stavu a po vytvoření umělých vad na článcích. Po provedení umělých vad lze vidět, které z nich lze identifikovat pomocí různých metod IRNDT.

## **Klíčová slova**

Solární článek, testování solárních článků, vady solárních článků, IRNDT, Lock In Thermography, Pulse Thermography, měření VA charakteristik, termografie, aktivní termografie

## **Abstract**

The master thesis presents the use of active thermography for solar cells testing. This work describes a basic categorisation of solar cells, their testing, their properties, defects and manufacturing methods.

Main part of this thesis deals with inspection of solar cells. Basic principles of solar cells testing are explained – especially VA characteristic measurement. Inspections with a use of active thermography methods are described.

The VA characteristic measurement and IRNDT (infrared non-destructive testing) measurement of 6 inch polycrystalline solar cells with two busbars are made. Cells are inspected in its original state and after making artificial defects. It is presented and discussed which IRNDT methods are well suited for detection of the artificial defects.

## **Key words**

Solar cell, solar cells testing, solar cells defects, IRNDT, Lock In Thermography, Pulse Thermography, VA characteristic measurement, thermography, active thermography

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 14.5.2017

Bc. Lukáš Muzika

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Olze Tůmové, CSc. za cenné rady, metodické vedení práce a za její ochotu. Také bych rád poděkoval NTC při ZČU za zapůjčení přístrojů a svému konzultantovi Ing. Michalu Švantnerovi, PhD. za cenné odborné rady a připomínky.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 SOLÁRNÍ ČLÁNEK</b> .....	<b>10</b>
1.1 PRINCIP FUNKCE .....	10
1.2 TYPY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ .....	12
1.2.1 Monokrystalické solární články .....	12
1.2.2 Polykrystalické solární články .....	12
1.2.3 Tenkovrstvé solární články .....	12
1.3 PARAMETRY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ .....	13
1.4 VADY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ .....	16
<b>2 TESTOVÁNÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ</b> .....	<b>18</b>
2.1 VIZUÁLNÍ INSPEKCE .....	18
2.2 MĚŘENÍ VA CHARAKTERISTIKY .....	18
2.2.1 Standardní podmínky testu STC .....	18
2.2.2 Extrakce parametrů $R_s$ , $R_{SH}$ a $n$ .....	19
2.2.3 Určení vad z VA charakteristiky .....	20
2.2.4 VA charakteristika bez osvětlení .....	21
2.3 ELEKTROLUMINESCENČNÍ MĚŘENÍ .....	21
2.4 UV FLUORESCENCE .....	22
2.5 CVTT – CAPACITANCE-VOLTAGE TRANSIENT TECHNIQUE .....	22
2.6 PHOTOCURRENT MAPPING .....	22
2.7 TERMOGRAFIE .....	22
2.7.1 IRNDT .....	23
2.7.2 Pulse Thermography .....	24
2.7.3 Lock In Thermography .....	26
<b>3 EXPERIMENT</b> .....	<b>30</b>
3.1 POPIS EXPERIMENTU .....	30
3.2 UMĚLE VYTVOŘENÉ VADY .....	31
3.3 TERMOGRAFICKÁ MĚŘENÍ .....	32
3.3.1 Flash Pulse měření .....	32
3.3.2 Halogen Lock In .....	33
3.3.3 LED Lock In .....	35
3.3.4 LED Lock In Ref a LED Solar Check .....	37
3.4 KVANTITATIVNÍ ANALÝZA TERMOGRAFICKÝCH MĚŘENÍ POMOCÍ CNR .....	37
3.5 VA CHARAKTERISTIKY .....	39
3.6 VYHODNOCENÍ PO ČLÁNCÍCH .....	49
3.7 DALŠÍ VÝSLEDKY .....	59
3.7.1 Článek s přirozenou vadou .....	59
3.7.2 Závislost výsledku při metodě Solar Check na algoritmu vyhodnocení .....	60
3.7.3 Laserem vytvořené vady na články ze sady 1 .....	61
3.8 DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	63
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>66</b>
<b>SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>67</b>



## Úvod

Zájem o využití alternativních zdrojů energie neustále roste. Jedním z typů takové energie je energie získaná z fotovoltaických článků. Klíčovým faktorem, který by vedl ke snížení jejich ceny, je zvýšení jejich spolehlivosti, doby života a vyšší účinnosti. Abychom mohli dosáhnout tohoto snížení cen, je třeba vyrábět články ve vysoké kvalitě a zajistit jejich dostatečnou a vhodnou kontrolu. Z tohoto důvodu je potřeba porozumět procesu výroby a procesům vzniků vad.

Aby bylo možné vhodně identifikovat vadu, musí být použita vhodná inspekční metoda. Jednou z nejčastěji využívaných metod měření solárních článků je měření VA charakteristiky. Z této charakteristiky bývá obtížné vyhodnotit typ vady. Proto se v hojně míře začaly rozvíjet metody elektroluminiscenční a termografická, které jsou schopné jednodušeji zjistit typ vady a jejich umístění.

Pro testování solárních článků se používá různých metod termografie. V této práci jsou některé metody popsány a realizovány na 6 palcových multikrystalických solárních článcích. V závěru práce jsou tyto metody srovnány a jsou diskutovány jejich výhody a nevýhody.

## Seznam symbolů a zkratk

$n$	.....	Ideality Factor (odchylka od ideální diody)
$R_s$	.....	Sériový odpor
$R_{SH}$	.....	Paralelní odpor
$P_{MAX}$	.....	Maximální výkon
$U_{MAX}$	.....	Napětí při maximálním výkonu
$U_{OC}$	.....	Napětí naprázdno
$I_{MAX}$	.....	Proud při maximálním výkonu
$I_{SC}$	.....	Proud nakrátko
$FF$	.....	Fill Factor
$TSR$	.....	Thermographic Signal Reconstruction
$FFT$	.....	Rychlá Fourierova transformace
$PPT$	.....	Pulse Phase Thermography
$LIT$	.....	Lock In Thermography
$CNR$	.....	Contrast to Noise Ratio
$NTC$	.....	Nové technologie – výzkumné centrum
$STC$	.....	Standard Test Condition
$DFT$	.....	Diskrétní Fourierova transformace
$HA$	.....	Harmonic Approximation

# 1 Solární článek

Solární článek (fotovoltaický článek) je zařízení, které je schopné přeměňovat světlo na elektrickou energii. K této přeměně využívá fotovoltaického jevu. Přestože se může zdát, že solární články byly objeveny až v posledních letech, jejich historie sahá do roku 1839, kdy byl objeven fotovoltaický jev Antoinem Becquerelem. [1]

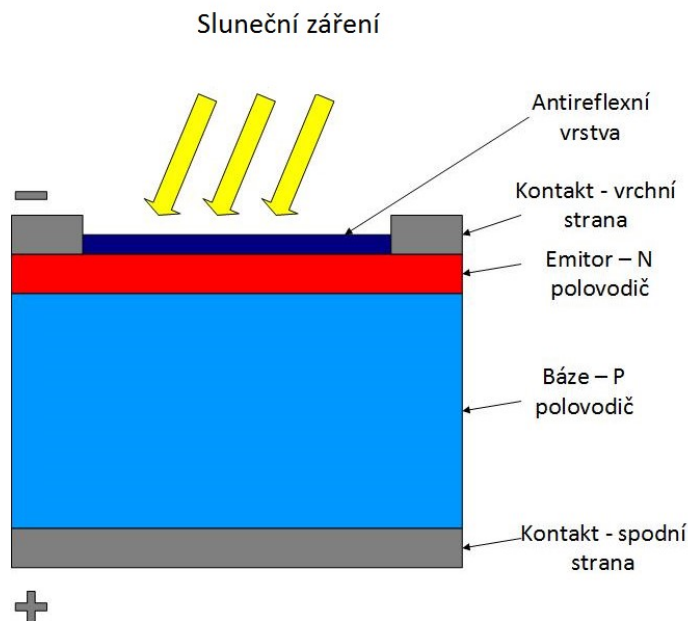
Ke konci 19. století se začínají objevovat první fotovoltaické články. [1] Tyto články měly velmi špatnou účinnost a pro praktické použití nebyly vhodné.

Velmi důležitým krokem pro solární články, jak je známe dnes, bylo objevení využití křemíku pro jejich výrobu. [1] V roce 1954 v Bellových laboratořích vytvořila skupina vědců Daryl Chapin, Calvin Fuller a Gerlad Pearson solární článek s dostatečným výkonem pro komerční využití. [2]

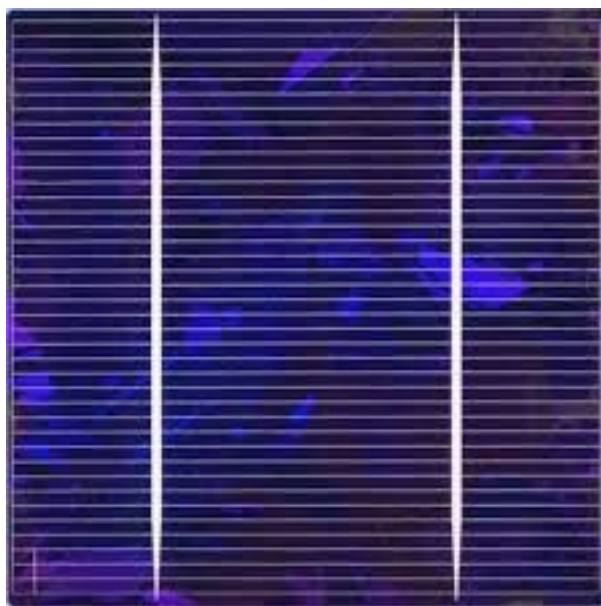
S postupem času se účinnost článků zvyšuje. Dnes jsou k dispozici články pro komerční užití s účinností 15 – 20 %.

## 1.1 Princip funkce

Solární článek je založen na principu fotovoltaického jevu, což je proces generování elektrické energie v solárním článku, když je vystaven světlu. [3] Solární článek je složen z polovodičů typu P a N, které spolu tvoří PN přechod. Dopadající fotony dodané slunečním zářením jsou absorbovány solárním článkem. Jestliže mají fotony vhodnou vlnovou délku, energie fotonů je přeměněna v PN přechodu na elektrony. To způsobí, že se elektrony z valenčního pásma přesunou do vyšší energetické hladiny - vodivostního pásma. Na článku jsou vytvořeny kontakty pro sběr těchto elektronů. [3] Na *Obr. 1* je ukázáno typické složení solárního článku.



Obr. 1: Typické složení solárního článku převzato z [4]



Obr. 2: Fotografie polykrystalického solárního článku s dvěma busbary

Na Obr. 2 je fotografie solárního článku. Zde jsou patrné dva silnější vodiče, které se nazývají busbary a zároveň kolmo k nim jsou úzké vodiče, které se nazývají fingers. Platí, že čím více busbarů, tím lépe se získává energie z článku, ale zároveň se snižuje aktivní plocha článku. Proto je třeba najít kompromis, kterým je nejčastěji článek se dvěma či třemi busbary.

Články se vyrábí v různých velikostech. Rozměry se udávají nejčastěji v palcích a články mají čtvercový tvar. Například pokud pořizujeme článek 6 palců, znamená to článek o velikosti 6 palců x 6 palců (tj. 156 mm x 156 mm). Články kromě velikosti dělíme i dle technologie výroby.

## 1.2 Typy solárních článků

Typ výroby ovlivňuje výsledné parametry článku např. účinnost. U většiny článků se využívá jako hlavního materiálu křemíku. Existují i články vyrobené z jiných materiálů než je křemík např. CdTe solární články nebo GaAs solární články. Základní dělení je na články monokrystalické, polykrystalické a tenkovrstvé.

### 1.2.1 Monokrystalické solární články

Tyto články mají obvykle seříznuté hrany. Důvodem, proč to tak je, je jejich výrobní proces, který typicky využívá Czochralskiho procesu. (Vytvoří se tavenina a z té se pak tažením získává monokrystal). [5] Díky využití procesu tažení během tvorby monokrystalů je ingot válcový. Dle potřeby pomocí dopování se vytvoří buď N nebo P polovodič. [6] Ingot je pak nařezán. Vytvoří se PN přechod, na něj se umístí antireflexní film a na něj se přidělá mřížka stříbrných kontaktů, která sbírá proud. Na spodní straně je celistvá vrstva hliníku. [7]

Běžná účinnost těchto článků je pod 20 %. [8][9] Tyto články jsou nejdražší ale zároveň také neúčinnější.

### 1.2.2 Polykrystalické solární články

Často se nazývají také multikrystalické. Při jejich výrobě se používá chemické depozice par. [5] Z této metody vzniknou poté polykrystalické tyče. Z nich se nařezou jednotlivé články, které se opatří potřebnou elektrodovou strukturou. [10] Účinnost těchto článků je kolem 15 %.

Tyto články mají menší účinnost než články monokrystalické. Jsou levnější, mají dobrý poměr cena/výkon. 69 % celkové produkce solárních článků jsou články polykrystalické (v roce 2015). [11]

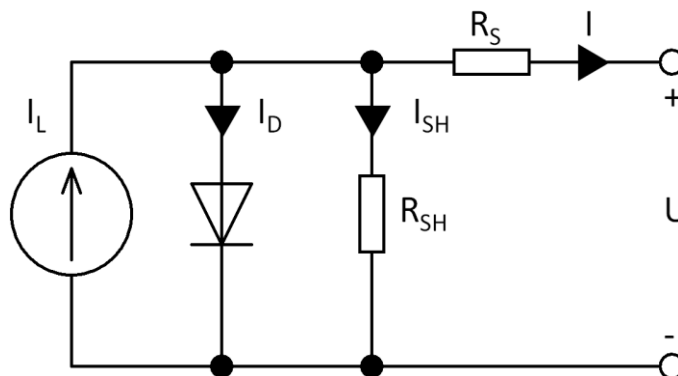
### 1.2.3 Tenkovrstvé solární články

Využívá se takzvané sandwichové konstrukce. Jednotlivé vrstvy článku jsou vytvořeny separátně a pak jsou dány dohromady. Existuje několik druhů tenkovrstvých článků. Rozdělují se podle použitých materiálů. Nejčastěji jsou používány: amorfni (používá se amorfni křemík), CdTe, CIS/CIGS, OPC (Organic Photovoltaic Cells).

Účinnost těchto článků se pohybuje okolo 10 %. Jsou levné. Je možné použít ohebný nosný substrát a díky tomu jsou velmi flexibilní. [10]

### 1.3 Parametry solárních článků

Aby bylo možné solární články snáze porovnávat, bylo definováno několik jejich parametrů. Některé tyto parametry se dají změřit přímo, jiné je třeba vypočítat. Většina z nich vychází z jednodiodového náhradního schématu, který je zobrazený na Obr. 3.



Obr. 3: Jednodiodové náhradní schéma solárního článku převzato z [4]

Jednodiodový model je založen na Schockleyho rovnici. [12] Tento model je v literatuře také označován jako pětiparametrový model. [13]

Výstup proudového zdroje je přímo závislý na osvětlení, které dopadá na článek. Tento model vyžaduje 5 parametrů pro vytvoření VA charakteristiky a to  $I_0$  (zpětný saturační proud), Ideality Factor (odchylka od ideální diody),  $R_S$  (sériový odpor),  $R_{SH}$  (paralelní odpor) a  $I_L$  (proud vytvořený fotovoltaickým jevem). [12]

Model je založen na předpokladu linearity. A to takové že proud, který teče přes článek, je tvořen dvěma proudy. Jeden vzniká v rámci PN přechodu a druhý jako proud vzniklý osvětlením. To nemusí být vždy přesné, ale pro stanovení VA charakteristiky dostatečné. Takto lze poměrně snadno získat základní představu o funkci článku. [12]

Diody představuje vlastnosti solárního článku (solární článek má vlastnosti podobné s fotodiódou, fungují na stejném principu). [4]

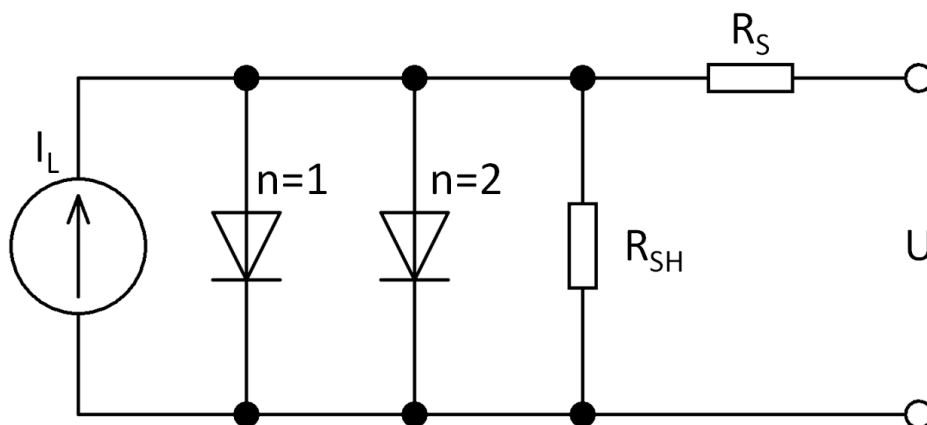
Rovnice 1.3.1 popisuje složení celkového proudu.

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(U+IR_S)}{n k T}} - 1 \right) - \frac{U+IR_S}{R_{SH}} \quad (1.3.1)$$

$I$  je celkový proud, který článek dodává.  $U$  je napětí získané z článku. Proud  $I_0$  je saturační proud.  $T$  je teplota článku (při standardních podmínkách 25 °C,  $q$  a  $k$  jsou konstanty ( $q$  - elementární náboj elektronu 1,602E-19 C,  $k$  - Boltzmannova konstanta 1,38E23 J/K),

$n$  odchylka od ideální diody (anglicky Ideality Factor, většinou 1-2).  $R_S$  je sériový odpor a  $R_{SH}$  je paralelní odpor.

Mimo jednodiodový model je také definován dvoudiodový model, který je vyobrazen na Obr. 4. Dvoudiodový model je přesnější při menším osvětlení. Ovšem vzniká u něj problém, že je třeba zjišťovat další parametry článku. Pro účely této práce postačí jednodiodový model, proto zde dvoudiodový model není podrobněji popisován.



Obr. 4: Dvoudiodové náhradní schéma solárního článku převzato z [4]

### Fill Factor

Jedním z nejpoužívanějších parametrů vyhodnocení solárních článků je  $FF$  (Fill Factor). Tento parametr udává, jak se liší ideální VA charakteristika od skutečné. Rovnice pro výpočet  $FF$  je rovnice 1.3.2.

$$FF = \frac{I_{max} \cdot U_{max}}{I_{sc} \cdot U_{oc}} \quad (1.3.2)$$

$I_{MAX}$  představuje výstupní proud při maximálním výkonu,  $U_{MAX}$  – výstupní napětí při maximálním výkonu,  $I_{sc}$  – proud nakrátko,  $U_{oc}$  – napětí naprázdno. Velké  $FF$  (>80) znamená, že se článek blíží ideální charakteristice. [4]

## Účinnost

Účinnost představuje podíl využití energie a energie vložené. Čím vyšší, tím lepší.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (1.3.3)$$

$P_{MAX}$  je maximální výstupní výkon a  $P_{in}$  je vyzářená energie na článek.

## Paralelní odpor (Shunt Resistance)

Malé  $R_{SH}$  (paralelní odpor) způsobuje ztrátu výkonu tím, že proud získaný fotovolatickým jevem, teče jinými cestami, než které byly pro tento účel záměrně vytvořené a díky tomu se zmenšuje proud protékající přes PN přechod a to způsobuje, že se zmenšuje výstupní napětí. V nejlepším případě je  $R_{SH}$  nekonečně velký. [4]

## Sériový odpor

Sériový odpor  $R_s$  je mezi bází a kolektorem solárního článku, odpor mezi křemíkem a vodičem, odpor kontaktů – v nejlepším případě je 0. [4] Sériový odpor snižuje jak Fill Factor tak výstupní napětí.



## 1.4 Vady solárních článků

Technologie výroby solárních článků zažívá ohromný vývoj, a to především z důvodů boomu zelené energie. Přestože technologie výroby se neustále vylepšuje, při výrobním procesu dochází ke vzniku vad. Vady však nevznikají pouze při výrobě, ale také při manipulaci s články, například při transportu, či instalaci.

Vady můžeme rozlišit na poruchy a na defekty. Jako porucha je považováno cokoliv, co sníží elektrický výkon článku. Velmi častou chybou je považování některých optických nedokonalostí, jako jsou například hnědé skvrny u okrajů článku za poruchu. Tento efekt je způsoben nanášením antireflexní vrstvy na článek a je velmi častý. [14]

Z pohledu celých solárních modulů se dělí poruchy dle bezpečnosti a výkonu. Definování modulů dle bezpečnosti je v normě IEC 61730-1 [15] a dle výkonu v normě IEC 61853-1 [16].

Defektem mohou být takové vady, které neovlivní elektrický výkon. Mohou například ovlivnit mechanickou pevnost. [14]

### Časté vady solárních článků

Mezi tyto vady patří vady způsobené technologií výroby, jako jsou například odloupenutá antireflexní vrstva (Antireflection Film Plating Back), nekompletní doleptání (Peripheral Etching Incomplete), poškrábaná až porušená mřížka (Grating Scratch).

Jelikož články jsou velmi křehké, mohou vzniknout i vady při balení a transportu článku. Mezi ně patří zlomená brána (Broken Gate), praskliny (Cracks), poškození vnějšími nečistotami (například pískem). V některých případech jde toto poškození odstranit.

Problémy vznikají i při přidělávání kontaktů na solární články – mezi vady například patří nedostatečné připájení kontaktů (Empty Solder) a i nadměrné připájení kontaktů (Over Welding). Při tomto jevu se kontakt nachází na příliš velké ploše, což ubírá funkční plochu článku.[17]

Mezi jedny z nejčastěji vyskytujících se vad patří trhliny (Cracks), vada způsobená růstem krystalu (Black Core), nadměrné připájení kontaktů (Over Welding). [17]

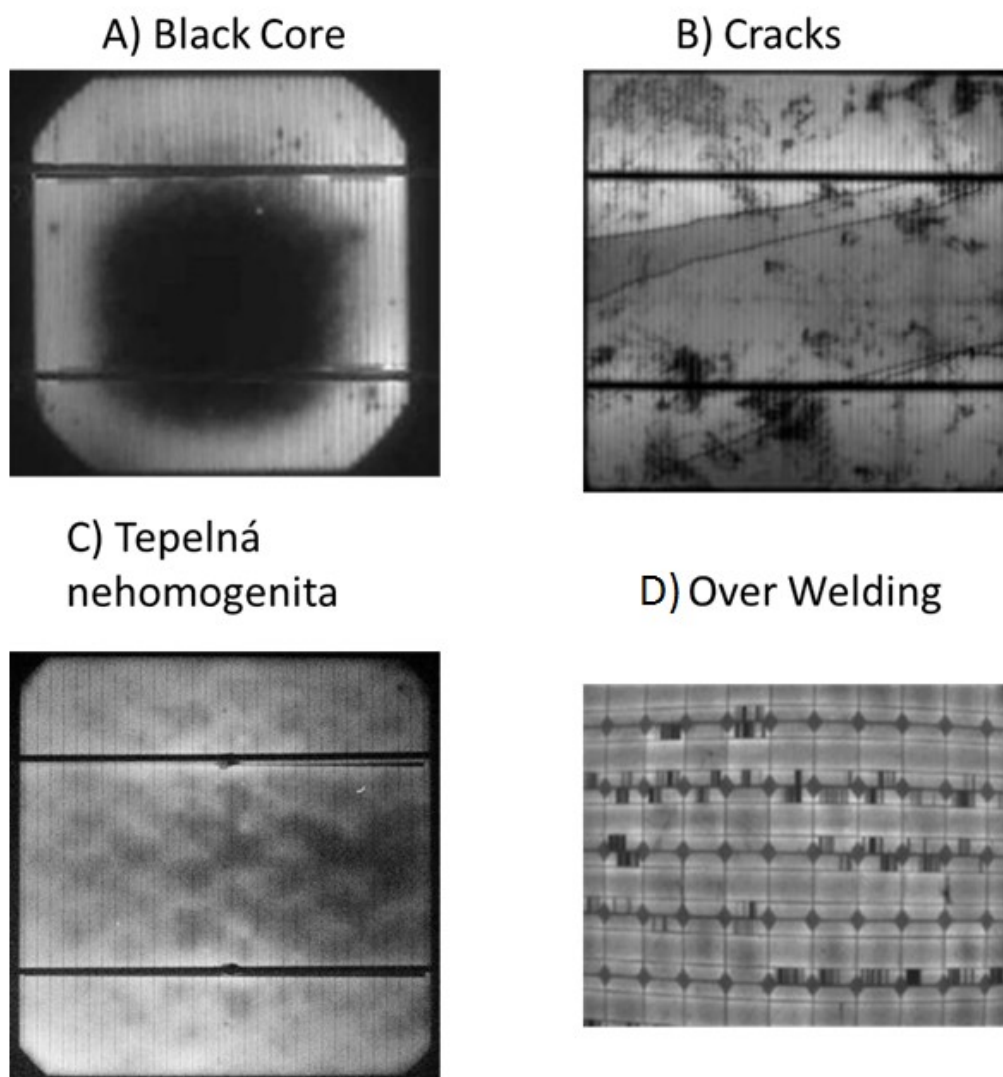
Black Core se někdy také označuje jako Black Heart, vzniká při výrobě článku, buď nečistotou materiálu (krystalu) nebo v monokrystalických článcích vzniká velkým tepelným zatížením při výrobě. Tento typ vady je spojen s růstem krystalu. Na *Obr. 5 a)* je ukázáno, jak se tato vada projeví na elektroluminiscenčním měření.

Jednou z nejčastějších vad jsou praskliny. Praskliny mohou vznikat od procesu výroby až po finální montování panelu. Tento jev způsobuje zvýšený nárůst sériové rezistivity, snižuje

zkratový proud ( $I_{sc}$ ) a  $FF$  (Fill Factor). Při větších rozměrech praskliny hovoříme o takzvaných Snail Cracks, které jsou patrné i pouhým okem. Na *Obr. 5 b*) je ukázána tato vada při elektroluminescenčním měření.

Tepelná nehomogenita způsobená transportním pásem během výroby je vidět na *Obr. 5 c*).

Over Welding – vzniká rozšířením kontaktu směrem k okrajům článku. Tento jev je vytvořen při pájení (navarování) kontaktů na článek. Jev má vliv především na účinnost článku. Jestliže oblast Overweldingu nepřesahuje 5 % z plochy článku, dá se článek považovat za použitelný. [17] Na *Obr. 5 d*) je vidět ukázka Overweldingu při použití elektroluminiscence.



*Obr. 5: Elektroluminiscenční měření - různé typy vad převzato z [14]*

## 2 Testování solárních článků

Solární články jsou používány jako zdroje energie, a proto parametry jako účinnost, Fill Factor,  $P_{MAX}$  a další jsou naprosto klíčové pro vyhodnocení, zda je článek bez vady.

Pro testování článku se používá celá řada různých metod. Ty jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 2.1 Vizuální inspekce

Je jednou z nejrychlejších metod testování solárních článků. Touto metodou je možné objevit především velmi výrazné vady, jako jsou poškrábaný článek, prasklý článek, porušení antireflexní vrstvy, delaminace, zkorodování busbarů. [14] Více informací lze nalézt v IEC 61215 [18].

### 2.2 Měření VA charakteristiky

Měřením se získávají parametry, které popisují solární článek. Standardně se sledují parametry  $U_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $FF$ ,  $P_{MAX}$ ,  $U_{MAX}$ ,  $I_{MAX}$ ,  $n$ , které byly popsány v kapitole 1.3.

Typický systém pro měření VA charakteristiky potřebuje pro svoji činnost světelný zdroj. Využívá se buď přirozeného slunečního záření, nebo umělého zdroje osvětlení. Dalšími částmi je modul, který měří a udržuje teplotu dle požadavku testu a systém pro sběr hodnot VA charakteristiky. Charakteristika se měří tak, že dochází ke změně napětí či proudu, která je způsobena změnou hodnoty elektronické zátěže nebo elektrického zdroje. [14] Přístroj bývá také vybaven referenčním solárním článkem, který slouží k měření intenzity osvětlení.

Při použití slunečního záření je třeba výsledné křivky přepočítat tak, aby byly porovnatelné se standardními podmínkami testu. Přepočet je popsán v IEC 60891 [19].

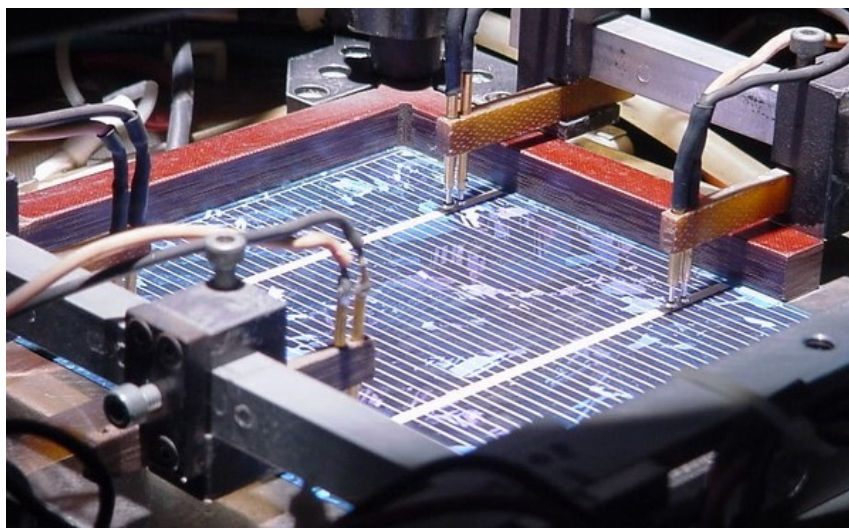
#### 2.2.1 Standardní podmínky testu STC

Pro testování solárních článků jsou definované standardní podmínky testu (STC - Standard Test Condition) dle normy IEC 60904-3 [20].

Jako umělý zdroj záření (solární simulátor) se používá generátor slunečního záření s definovaným spektrem AM1.5 G. [21] Spektrum AM 1.5 G je definováno v normě ISO 9845-1:1992 [22]. Nejčastějším zdrojem pro generování tohoto spektra je Xe Arc lampa. [21]

Pro měření solárních článků se používá intenzita osvětlení  $1 \text{ kW/m}^2$ , to odpovídá intenzitě záření Slunce. Měří se při teplotě článku  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro nastavení této teploty bývá článek uložen na velký kovový blok, který je ještě chlazen vodou a je snímána teplota článku. Pro měření se využívá 4 sondové snímání pro eliminaci přechodového odporu. [4]

Na Obr. 6 je zobrazeno 4 sondové snímání.



Obr. 6: Přístroj pro měření VA charakteristiky [4]

Používají se dvě sondy (proudová a napěťová) na horní straně článku a dvě na spodní. Na spodní straně se většinou užívá kovový blok jako sonda. [4]

### 2.2.2 Extrakce parametrů $R_S$ , $R_{SH}$ a $n$

Získání parametrů  $n$ ,  $R_S$ ,  $R_{SH}$  je poměrně komplikovanou záležitostí. Hlavním důvodem je to, že rovnice jednodiodového (i dvoudiodového) modelu je zadána implicitně. Existují metody založené na iterativních metodách (Newton-Raphson iterační metoda) a metody, jež používají Lambert w funkce.

V rámci této diplomové práce byla použita právě taková metoda. Metoda je detailně popsána v článku [23]. Původní analytická rovnice 1.3.2 je nahrazena rovnicí 2.2.1.

$$I = \frac{n k T}{q R_S} \cdot \text{lambertw} \left[ \frac{q R_S}{n k T} \cdot \left( I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_S + R_{SH}} \right) \cdot \exp \left( \frac{-q V_{OC}}{n k T} \right) \cdot \exp \left( \frac{q}{n k T} \cdot \left( R_S I_{SC} + \frac{V R_{SH}}{R_S + R_{SH}} \right) \right) \right] + \frac{V}{R_S} - I_{SC} - \frac{V R_{SH}}{R_S (R_S + R_{SH})} \quad (2.2.1)$$

Při využití této rovnice a Matlabu lze pomocí funkce `nlinfit` snadno získat parametry  $n$ ,  $R_S$  i  $R_{SH}$  v případě, že je VA charakteristika známa. Bod  $P_{MAX}$  se vypočítá tak, že se vynásobí jednotlivé napětí a proudy z VA charakteristiky. A poté se nalezne ten s nejvyšší hodnotou. Po nalezení  $P_{MAX}$  lze velmi snadno spočítat  $FF$  dle rovnice 1.3.3.

### 2.2.3 Určení vad z VA charakteristiky

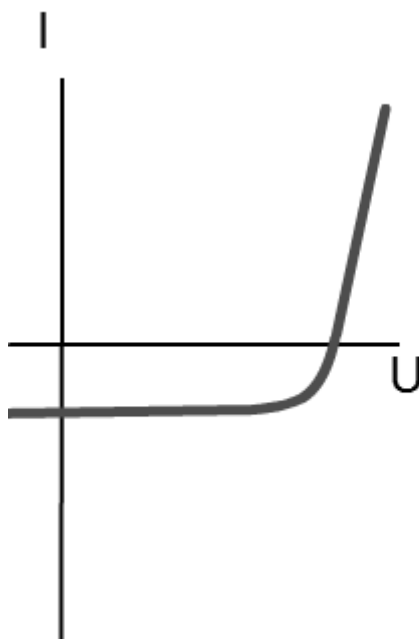
V případě, že jsou známa pouze naměřená data a ne data, která udává výrobce, je možné rozpoznat, jaká technologie výroby článku byla použita a to z parametru  $FF$ . Hodnota  $FF$  pro monokrystalické články by měla být  $0,8 - 0,85$  a pro polykrystalické  $0,75 - 0,8$  při STC. [14] Z tvaru charakteristiky je možné zjistit, které články jsou nefunkční. Charakteristika je výrazně deformovaná, případně ji nelze vůbec změřit. [14]

V případě, že jsou známa i data od výrobce, lze si udělat představu o tom, v jakých článcích je pravděpodobné, že se nachází vada. [14]

V případě, že jsou známa i předchozí měření článků lze hodnotit, jak rychle články degradují. [14]

Menší  $I_{SC}$  než je udáno výrobcem, je dáno ztrátou ozáření článku. To může být způsobeno jak nedodržením STC, tak vadami, které zabraňují dopadu světla na článek. Do této kategorie může spadat například hnědnutí či žloutnutí článku, či delaminace.

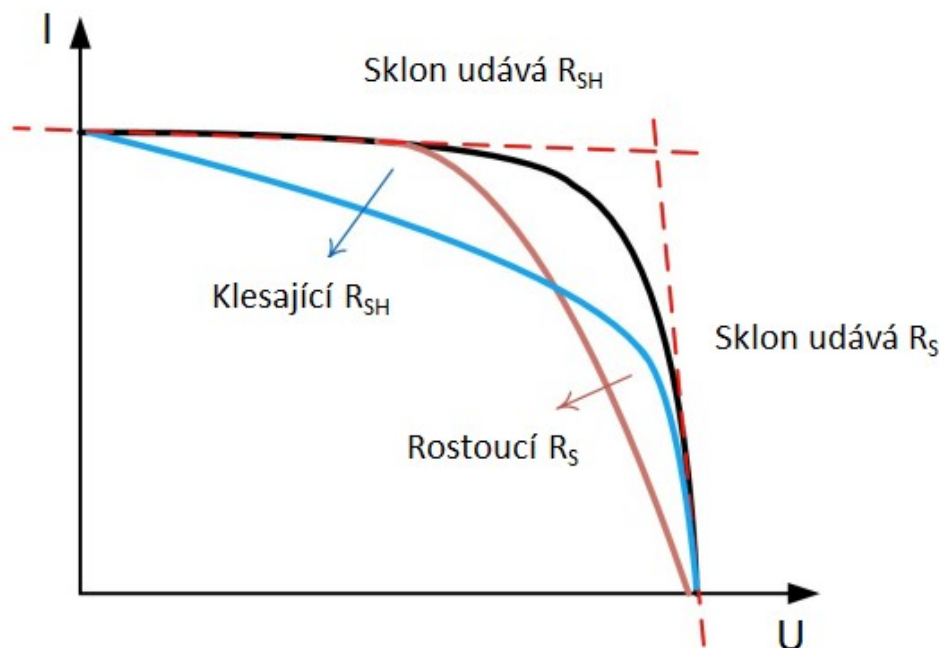
Na Obr. 7 je znázorněna VA charakteristika solárního článku. Ve čtvrtém kvadrantu se nachází ta část, která generuje energii.



Obr. 7: VA charakteristika solárního článku

Při znázornění VA charakteristiky solárního článku se dle konvence kreslí pouze čtvrtý kvadrant s tím, že osa y (tj. proudová osa) má kladné hodnoty viz Obr. 8.

Na Obr. 8 je kromě VA charakteristiky solárního článku dle konvence znázorněn i vliv parametrů  $R_S$  a  $R_{SH}$  na její tvar.

Obr. 8: VA charakteristika vliv  $R_s$  a  $R_{SH}$ 

#### 2.2.4 VA charakteristika bez osvětlení

VA charakteristiku je možné také měřit bez osvětlení. Díky tomu, že článek není osvětlen, se dají zkoumat diodové vlastnosti článku. VA charakteristika takového zapojení má stejný charakter jako VA charakteristika diody. Pro vyhodnocení VA charakteristiky v režimu bez osvětlení se vynášší proudová osa v semilogaritmickém měřítku. [4] Nevýhodou této metody je, že cesty proudu se liší při osvětlení článku a při neosvětlení. [4] Typický článek využíváme, když je osvětlen, proto je běžnější měřit VA charakteristiku při osvětlení, protože hodnoty, které jsou získány, mají vyšší vypovídající hodnotu.

### 2.3 Elektroluminiscenční měření

Článek se napájí stejnosměrným proudem, aby došlo ke stimulaci zářivé rekombinace. Tato elektroluminiscenční emise se detekuje CCD kamerou. [14]

Elektroluminiscenční snímání je prováděno bez přítomnosti světla (tj. v zatemněném prostředí) a to z důvodu, že infračervené záření emitované solárním modulem je nízké ve srovnání s případným okolním zářením. Hlavním důvodem použití zatemněného prostředí je snížení šumu při EL snímání. Rozlišení kamery by mělo být minimálně tak vysoké, aby bylo možné rozpoznat fingerly. [14]

Elektroluminiscenční metodou je možné zachytit například trhliny, praskliny, přerušení vodičů (jak busbarů, tak fingerů), korozi způsobenou vlhkostí, nehomogenity způsobené transportním pásem při výrobě. [14] Ukázky elektroluminiscenčního měření jsou vidět v kapitole 1.1.

## 2.4 UV fluorescence

Pro testování lze využít také metody UV fluorescence, u této metody nastává problém, že pro plnou analýzu je třeba solární článek zničit. Více informací je uvedeno v [14].

## 2.5 CVTT – Capacitance-Voltage Transient Technique

Jedna z velmi často používaných metod pro kontrolu článků. [24] Tato metoda spadá pod metody nedestruktivního testování materiálů. Princip je založen na snímání C-V křivky ihned po emisi pulzu aplikovaném na článek. Nastaví se napětí a kapacita je odečítána jako funkce napětí. V případě CVTT je napětí ve formě pulzů. [24]

## 2.6 Photocurrent Mapping

Tento způsob vyhodnocení počítá s tím, že v solárním článku nejsou všude homogenní ztráty účinnosti. Proto je použit monochromatický laserový paprsek, který osvětlí pouze bod (malou část) vzorku. [24]

## 2.7 Termografie

Je bezkontaktní metoda měření teplotního pole. Princip je založen na detekci povrchové radiace v infračervené oblasti spektra, která bývá nejvíce závislá na teplotě a tepelně-optických vlastnostech povrchu.

Pro zachycení teplotního pole se využívají infračervené kamery. Statickému záznamu tj. jednomu snímku se říká termogram. Pokud se snímají termogramy v čase, výsledný záznam se nazývá termografická sekvence. V ní jsou zachyceny změny teploty v čase. Na trhu se objevuje velké množství typu termokamer s různými vlastnostmi (rozlišení, citlivost, spektrum, rychlost snímání, apod.) pro velkou škálu aplikací.

Energie, kterou snímá termokamera, se ve skutečnosti skládá z několika dílčích energií. Skládá se z energie, kterou vyzařuje měřené těleso, z energie odražené a energie z externího zdroje. Vlastnost tělesa vyzařovat nazýváme emisivitou. Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. [25] Výsledná emisivita materiálu může být ovlivněna velkým množstvím faktorů. Například vlnovou délkou, teplotou, barvou, strukturou. Emisivita nabývá hodnot 0-1. Hodnotu 0 pro materiály bez vyzařování. Hodnotu 1 pro ideální absolutně černé těleso (Black Body Radiator).

Termografie se dělí na aktivní nebo pasivní a kvalitativní nebo kvantitativní. Při kvantitativní termografii se zobrazují teploty ve formě numerických hodnot. Pro zjištění skutečné teploty musí být známa celá řada parametrů například emisivita, okolní teplota, atmosférické podmínky a další. Tato metoda se používá např. při kontrole technických procesů nebo v aplikacích tepelného zpracování [26]. Tedy v oblastech, kde je skutečná teplota měřeného objektu klíčová. Kvalitativní termografie je zaměřena především na kontrast mezi různými plochami s odlišnou teplotou. Zde tedy nezáleží na skutečných teplotách, ale spíše na zachyceném rozdílu. Tato metoda se využívá např. pro zachycení tepelných úniků, pro lékařské aplikace a další. Aktivní termografie využívá různých druhů buzení pro vytvoření změny teploty (ohřátí/ochlazení), po kterém (někdy i během) se provádí snímání teplotního pole. Díky tomu se dají odhalit defekty spojené s tepelnou vodivostí a výměnou tepla. Pasivní termografie detekuje přirozené záření měřeného objektu.

Výhodou termografie je, že teplotní pole je snímáno bezkontaktně. Díky tomu není potřeba využívat tepelnou sondu, která může způsobit změnu chování snímaného subjektu. Dalšími výhodami je možnost měření ve velkém teplotním rozsahu a měření rychle se pohybujících objektů. Nevýhodou inspekce je, že je závislá na okolní teplotě, na okolních atmosférických podmínkách a tepelných a optických vlastnostech měřeného materiálu.

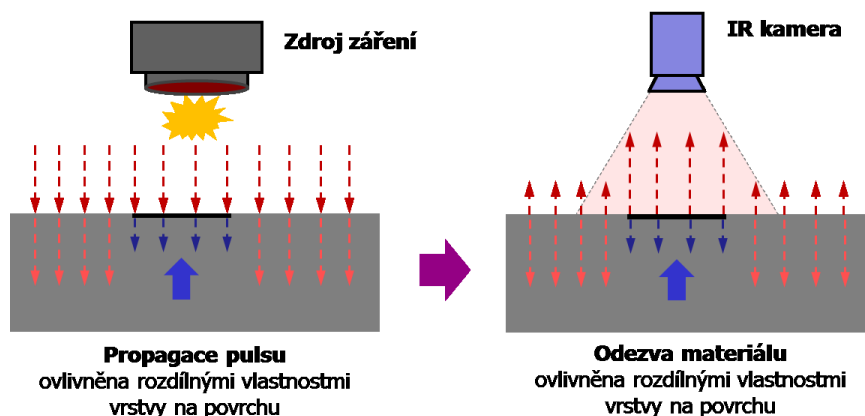
Jednou z aplikací termografie je použití při testování solárních panelů a článků. Při testování panelů jsou panely osvětleny slunečním zářením. Záření musí mít intenzitu minimálně  $500 \text{ W/m}^2$  [27], aby bylo možné zachytit případné defekty. V jednotlivých článcích probíhá fotovoltaický jev, který vytváří elektrickou energii. Články v panelu jsou tedy ohřívány nejenom slunečním zářením, ale i protékajícím proudem. V případě, že je některý článek z panelu poškozen, tak se tento článek ohřívá méně (Cold Spot) případně více (Hot Spot) než zbylé články. Zda se bude ohřívát více či méně záleží na charakteru vady [27]; např. při zkratování článku dochází k výraznému ohřevu.

Pro inspekci vad solárních článků se využívá metod testování založených na aktivní termografii. Tento typ inspekce je popsán v následující kapitole.

### 2.7.1 IRNDT

IRNDT (infračervené nedestruktivní testování) je moderní inspekční metoda, která je založena na aktivní termografii. Princip je takový, že se tepelně vybudí testovaný objekt, tím se do něj dodá energie a sleduje se tepelná odezva pomocí infrakamery. Tato odezva může ukázat změny v tepelném přenosu způsobené různými defekty. Na *Obr. 9* je schematicky znázorněné IRNDT měření.





Obr. 9: Schematické znázornění IRNDT měření [28]

Využívá se několik různých metod buzení v závislosti na vlastnostech materiálu, použitém zdroji buzení a dalších požadavcích (oblast inspekce, rychlost inspekce, apod.). Zdroj buzení musí vytvořit dostatečný kontrast, aby byla vada zachytitelná. Jako zdroje buzení se využívají různé fyzikální principy například světelná excitace (halogenové lampy, flash lampy, ...), mikrovlnné záření, elektromagnetická indukce, ultrazvukové vlnění, tepelná konvekce (ohřev vzduchem). Tyto zdroje vytváří ve sledovaném objektu tepelnou odezvu.

Metody buzení se liší v charakteru zatěžování.

Metody se dělí na [28]

- *Pulse Thermography* – budící zdroj ozařuje měřený objekt velmi krátkou dobu. Analyzuje se oblast chladnutí.
- *Lock-In Thermography* – energie je do vzorku dodána formou modulovaného periodického signálu (např. sinus, trojúhelník, obdélník). Analyzuje se amplitudová a fázová odezva. Tato metoda je nejčastěji používanou metodou termografie pro testování solárních článků.
- *Transient (Step) Thermography* – pro měření je použit delší čas. Sleduje se tepelná odezva.

Pro testování solárních článků se standardně využívají metody Lock In termografie. Jejich nevýhodou je, že měření trvají relativně dlouhou dobu (několik desítek minut). V rámci experimentu byla testována i pulzní termografie, u které jsou doby měření řádově nižší (několik s). Pulzní termografie se standardně pro testování solárních článků nevyužívá.

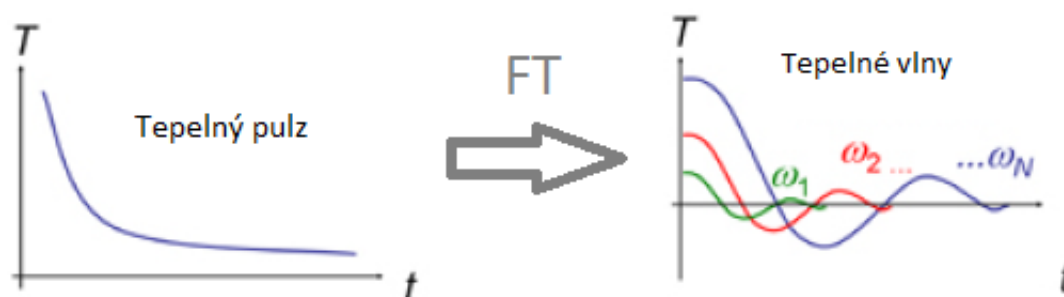
### 2.7.2 Pulse Thermography

Nejdříve se testovaný vzorek vybudí buzením, které má charakter pulsu. Pro účely této metody se většinou využívá flash lampa s tím, že pulz trvá několik ms. Je možné použít i jiné zdroje. Typická odezva na takovýto pulz je zobrazena na Obr. 10 v levé části.

V oblasti, kde se nachází vada, se odezva liší od oblastí bez vady. Pro zvýraznění rozdílů v teplotní odezvě (tj. defektů) se využívá různých algoritmů. Nejčastěji se využívá algoritmu TSR a Pulse Phase algoritmu. Běžný termogram je schopný vady zachytit pouze ve velmi výjimečných případech.

TSR (Thermographic Signal Reconstruction) je algoritmus, při kterém je každý bod termografické sekvence proložen funkcí, která lze analyticky zderivovat. Po provedení této derivace jsou vady vidět výrazně lépe.

Další možností je využití Pulse Phase algoritmu. Je známé, že jakýkoliv signál může být aproximován součtem sinusových vln různých frekvencí. Příklad je zobrazen na obrázku níže.



Obr. 10 Odezva na flash pulz a přeměna pomocí Fourierovy transformace, převzato z [29]

Právě tohoto jevu se využívá a na každý bod termogramu se aplikuje Fourierova transformace. (Pro počítačové využití se používá diskrétní Fourierova transformace, případně rychlejší FFT (Fast Fourier Transformation)).

Rovnice diskrétní Fourierovy transformace je zobrazena níže. [29]

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k \Delta t) e^{-j 2 \pi n k / N} = Re_n + Im_n \quad (2.7.1)$$

Na základě F se vyjádří amplitudový (2.7.2) a fázový signál (2.7.3) pro každý pixel termovizního záznamu.

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \quad (2.7.2)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{Im_n}{Re_n} \quad (2.7.3)$$

Pro vyhodnocení teplotní odezvy se využívá fázového nebo amplitudového signálu. Fázový signál má oproti amplitudovému tu výhodu, že není do takové míry ovlivněn nerovnoměrným ohřevem [29] a pro vyhodnocení je proto většinou výhodnější.

### 2.7.3 Lock In Thermography

Vzorek se budí periodickými tepelnými vlnami. Může se jednat o sinusový, obdélníkový i jakýkoliv jiný tvar. Aby byl vzorek dostatečně vybuzen, je třeba použít několik period zatěžování. Pro vyhodnocení se využívá tzv. Lock In termografie. Existuje více možností, jak provádět zpracování Lock In termografie.

Lock In termografie je založena na principech Lock In zesilovačů. Ty umožňují měřit velmi nízké hodnoty signálů v prostředí šumu. Dříve se využívaly tyto zesilovače pouze v analogové formě. S rozvojem výpočetní techniky bylo umožněno vytvoření digitální verze. Této formy se využívá i pro Lock In termografii. Pro použití této techniky je nutné, aby bylo buzení periodické.

Existuje více možností, jak digitálně vytvořit Lock In algoritmus, pro účely této práce je popsán algoritmus, který se nazývá Two Channel Correlation, a který se zároveň využívá nejčastěji. Více o Lock In termografii a jejích principech je popsáno v [30].

$$S = \frac{1}{n \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n K_j \cdot F_{i,j} \quad (2.7.4)$$

$$K_j^0 = 2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (j-1)}{n}\right) \quad (2.7.5)$$

$$K_j^{-90} = -2 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (j-1)}{n}\right) \quad (2.7.6)$$

Rovnice 2.7.4 - 2.7.6 [30] popisují Two Channel Correlation.  $K$  jsou vázící koeficienty. Tyto koeficienty jsou dva.  $K^0$  je pro výpočet signálu ve fázi a  $K^{-90}$  je pro výpočet signálu mimo fázi (posunutý o  $-90^\circ$ ). Parametr  $n$  je počet vzorků na jednu periodu.  $N$  je kolik period, je celkově snímáno. Z vypočtených signálů (ve fázi a mimo fázi) se vypočte amplitudový a fázový signál dle rovnic 2.7.7 a 2.7.8. [30]

$$A = \sqrt{(S^0)^2 + (S^{-90})^2} \quad (2.7.7)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{S^{-90}}{S^0}\right) \quad (2.7.8)$$

Amplitudový a fázový signál se vypočte pro každý pixel termografického záznamu. Tyto signály popisují teplotní odezvu na použité buzení.

Další možností Lock In termografie je použití diskretní Fourierovy transformace. Zde se vychází z rovnic 2.7.9 a 2.7.10.

$$A_{cos} = \sum_{k=1}^N T(k) \cdot \cos(2 \pi f \Delta t) \quad (2.7.9)$$

$$A_{sin} = \sum_{k=1}^N T(k) \cdot \sin(2 \pi f \Delta t) \quad (2.7.10)$$

$N$  je počet snímků v sekvenci,  $f$  je frekvence a  $\Delta t$  je čas mezi sousedními snímky. Fázový a amplitudový signál se vypočte z rovnic 2.7.11 a 2.7.12.

$$A = \sqrt{(A_{cos})^2 + (A_{sin})^2} \quad (2.7.11)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_{cos}}{A_{sin}}\right) \quad (2.7.12)$$

To jaký algoritmus vyhodnocení ukáže lepší výsledek, záleží především na materiálových vlastnostech měřeného objektu.

Při použití Lock In termografie na solárních článcích existují různé modifikace této metody. Liší se jak v použitém zdroji buzení tak také v tom, zda je článek nakontaktován, či nikoliv. Pro přehled jsou uvedeny některé možnosti testování. Popis těchto metod je spíše informativního charakteru. Metody, které jsou použity pro vlastní měření, jsou rozepsány podrobněji v části pojednávajícím o vlastním měření.

Používané Lock In metody pro testování solárních článků:

- Článek není nakontaktován -  $V_{oc}$ -ILIT
- Článek je nakontaktován -  $J_{sc}$ -ILIT,  $R_s$ -ILIT, MF – ILIT, DLIT

$V_{OC}$ -ILIT – solární článek je zapojen naprázdno (Open Circuit), tzn., že není nakontaktován. Při tomto zapojení jsou Joulovy ztráty minimální, protože přes mřížku neprochází žádný proud. Při osvětlení, jehož intenzita je srovnatelná se slunečním zářením, vznikají ve vzorku nehomogenní teplotní pole způsobené zbytkovými proudy, které jsou nejvyšší při intenzitě srovnatelné se slunečním zářením. Tohoto jevu se dá využít pro zjištění lokální životnosti článku. Při nižší intenzitě jsou výsledky srovnatelné s DLIT. [31] Tato metoda se využívá hlavně v případě, kdy na článek ještě nejsou nanášeny vodiče, protože v tomto případě jsou metody, které potřebují pro svůj chod článek nakontaktovat, nepoužitelné. [32] Metodu je možné využívat i pro testování nakontaktovaných článků. Tato metoda byla použita pro vlastní experiment.

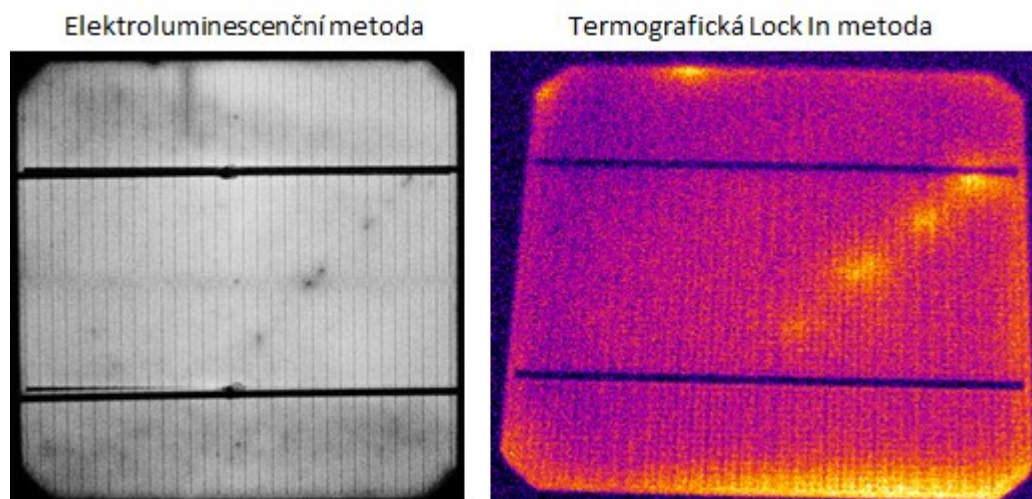
$J_{sc}$ -ILIT- solární článek je zkratován. Při tomto způsobu zapojení jsou vidět Joulovy ztráty zbytkového proudu a termalizační teplo PN přechodu. [31]

$R_s$ -ILIT- Při této technice je vzorek neustále ozářen a pod napětím, které pulzuje od 0 do 0,5 V. Článek je nakontaktován. [31]

MF – ILIT – ILIT s násobícím faktorem. Tato metoda umožňuje rozlišit mezi lavinovým průrazem a Zenerovým jevem v solárním článku. Výsledný obrázek je vytvořen ze dvou měření. Světelný pulz má intenzitu 0,1 intenzity Slunce a vlnovou délku 850 nm. Do článku jsou přivedena dvě konstantní záporná napětí. Při nízkém záporném napětí se vytvoří proud, který zahřeje vzorek izotropně. Při vyšším záporném konstantním napětí se objeví lavinové průrazy, zvětší se proud a ta část solárního článku, kde se objeví lavinový průraz, se ohřeje mnohem víc než ta, kde se průraz neobjeví. Jevy, které neovlivňuje proud způsobený fotoelektrickým jevem, se na výsledné evaluaci u této metody neobjeví. [33]

DLIT – Pro testování článků se využívá také metoda, při které se článek nachází ve tmě, není osvětlen žádným zdrojem záření. Díky tomu, že článek není osvětlen, se dají zkoumat diodové vlastnosti článku. Článek je nakontaktován a ke kontaktům je přivedeno napětí. Pro zjištění, jestli je vada lineární (ohmická) nebo nelineární, se používají dvě napětí, jedno kladné a jedno záporné. Většinou se používá napětí +0,5 V a -0,5 V. Jestliže při vyhodnocení obou obrázků jsou vady na stejném místě a při podobné intenzitě, jsou vady lineární. Jestliže se vady na obrázkách velmi zřetelně liší, jsou nelineární. V některých případech se používá i vyšší napětí než je 0,5 V. V tom případě je difúzní proud majoritní a na evaluaci jsou vidět i oblasti se špatnou kvalitou krystalů (ty obsahují více defektů). [33]

Na *Obr. 11* lze vidět srovnání měření stejného článku elektroluminescenční metodou a termografickou metodou Lock In.



Obr. 11: Výsledky inspekce elektroluminiscenční a termografickou Lock In metodou

Obě měření v tomto případě ukazují velmi podobné výsledky. To, zda se snímky inspekčních metod budou lišit, závisí především na charakteru vady a na použití vhodného nastavení měření a vyhodnocení u metody Lock In.

### 3 Experiment

Cílem experimentu bylo ověřit, zda a jaké inspekční metody aktivní termografie jsou schopné zachytit vady v solárních článcích. Experimenty byly provedeny na experimentálním zařízení výzkumného centra Nové technologie – výzkumné centrum na Západočeské univerzitě v Plzni (NTC) a katedry technologií a měření (KET) na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Bylo použito několik různých druhů buzení: flash lampa, halogenová lampa a zdroj složený z LED diod. Byly testovány metody Flash Pulse, Halogen Lock In, LED Lock In, LED Lock In Ref, LED Solar Check. Aby bylo možné rozpoznat, zda metody jsou schopny zachytit vady, byly na články uměle vytvořeny vady. Nejdříve však byly všechny články otestovány bez uměle vytvořených vad, aby bylo možné vidět srovnání před a po vytvoření vady.

Hlavním kritériem článku je jím dodávaný výkon, proto byly kromě termografických měření realizována i měření VA charakteristik.

#### 3.1 Popis experimentu

Experiment byl proveden na dvou typech článků. Oba typy jsou vyrobené stejnou technologií, tj. jedná se o multikrystalické články, o velikosti 6 palců, se dvěma busbary. Rozdíl byl v dodavateli. V obou případech se jedná o články neznámých katalogových hodnot. Články od prvního dodavatele jsou v této práci označeny jako sada 1, od druhého jako sada 2. V sadě 1 je 15 článků značených číslem 1 až 15. Články z druhé sady jsou označeny číslem 32 až 38. V tomto případě se tedy jedná o 7 článků. Celkový počet testovaných článků je 22.

Po nalezení vhodných parametrů měření se u článků provádělo:

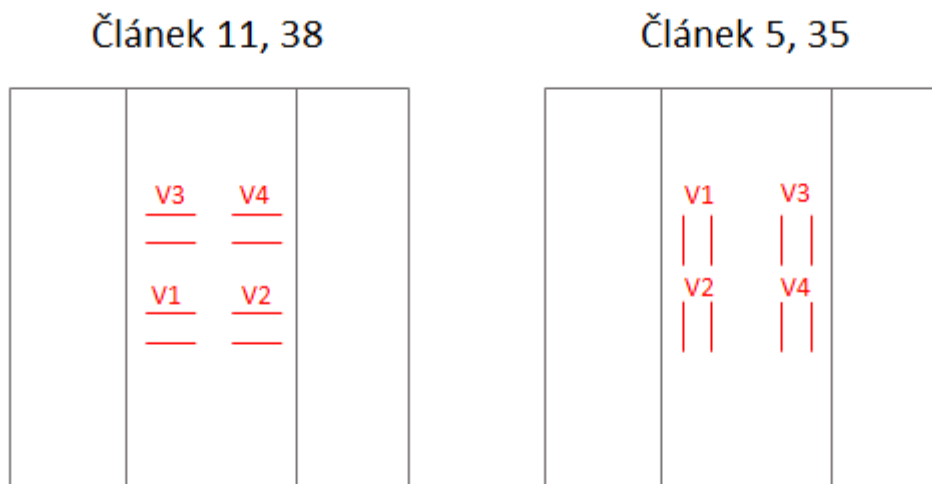
1. Měření VA charakteristiky před poškozením (všechny články)
2. Měření pomocí aktivní termografie (všechny články) – metody Flash Pulse, Halogen Lock In, LED Lock In, Solar Check, LED Lock In Ref.
3. Poškození laserem (články 5, 11, 32-38)
4. Měření VA charakteristiky po vytvoření poškození (32-38)
5. Měření pomocí aktivní termografie po poškození (články 5, 11, 32-38) – metody Flash Pulse, Halogen Lock In, LED Lock In, Solar Check, LED Lock In Ref.

Nejdříve jsou popsány detailněji jednotlivá měření a parametry nastavení. Poté jsou prezentovány výsledky po jednotlivých článcích (články 32-38) a dále jsou ukázány výsledky, které nejsou uvedeny v kapitole Výsledky po jednotlivých článcích.

### 3.2 Uměle vytvořené vady

Uměle vytvořené vady byly realizovány laserem. Důvodem použití laseru je možnost simulovat celou škálu vad, díky možnosti precizně nastavit parametry laserového procesu. Pro poškození článku byl použit laser SPI G3-HS 20 W se skenovací hlavou Scancube 10 s f-theta objektivem ( $f=160$  mm).

Byly vytvořeny různé typy vad. Byly poškozeny fingery (článek 5, 32, 35, 36, 37), busbary (článek 33, 34) a vytvořeny vady podobné trhlinám (článek 11, 38). Pro vytvoření vad byl použit veškerý výkon laseru, rychlost 100 mm/s a skenovací frekvence 25 kHz. To platí pro všechny umělé vady kromě článků 5, 11, 35 a 38, kde bylo vytvořeno více geometricky totožných vad s jinými laserovými parametry. To pro určení, zda metody IRNDT dokáží rozpoznat rozdíly mezi jednotlivými vadami. Rozmístění vad je ukázáno ve vizualizaci na Obr. 12 a parametry jsou v Tab. 1.



Obr. 12: Vizualizace rozmístění vad - článek 5, 11, 35, 38

Tab. 1 Parametry laserového procesu

	Výkon[%]	v [mm/s]	f [kHz]
V1	100	100	25
V2	100	100	66
V3	100	800	25
V4	100	200	25



### 3.3 Termografická měření

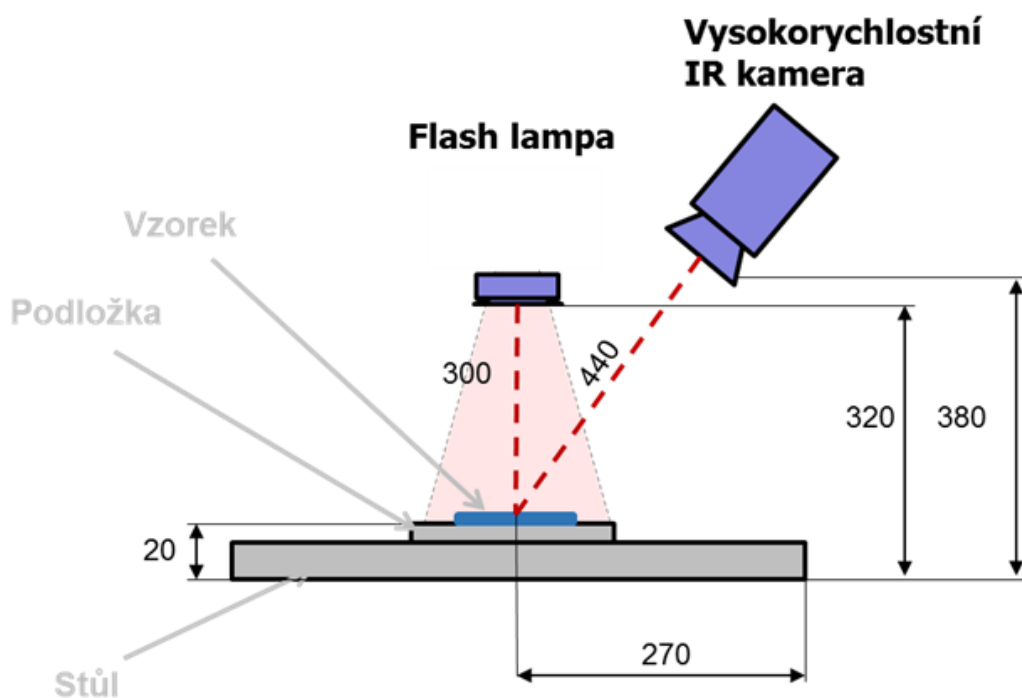
Všechna měření byla provedena vysokorychlostní kamerou Flir SC7650E, její parametry jsou uvedeny v *Tab. 2*. Použitý software byl SW od Automation Technology a to IRNDTv1.4.

*Tab. 2 Parametry kamery Flir SC7650E*

Typ senzoru	InSb
Vlnové délky	1,5 - 5,1 $\mu\text{m}$
Rozlišení	640x512
Vzorkovací frekvence (při max rozlišení)	100 Hz
Max vzorkovací frekvence (při 48x4 pixelů)	3400 Hz
Teplotní rozsah	-20 - 3000 $^{\circ}\text{C}$
Přesnost měření teploty	$\pm 1\%$
NETD (Noise Equivalent Temperature Difference)	< 25 mK

#### 3.3.1 Flash Pulse měření

Jako zdroj buzení byla použita flash lampa o výkonu 6 kJ. Na *Obr. 13* je znázorněna konfigurace umístění jednotlivých prvků měřicí soustavy. Rozměry jsou udány v mm.



*Obr. 13: Konfigurace - Flash Pulse*

Na *Obr. 14* je uvedena fotografie z měření.



*Obr. 14: Fotografie z měření - Flash Pulse*

Při nastavení Flash Pulse měření se nastavují parametry frekvence kamery a počet nahrávaných snímků. Frekvence kamery udává vzorkovací frekvenci kamery. Počet nahraných snímků uvádí, kolik snímků bude kamerou nahráno. Tento parametr udává dobu měření. Doba záblesku je 3-5 ms. Ta se nedá v této konfiguraci měnit. Všechny parametry měření jsou uvedeny v *Tab. 3*.

*Tab. 3 Parametry měření Flash Pulse*

Parametry měření

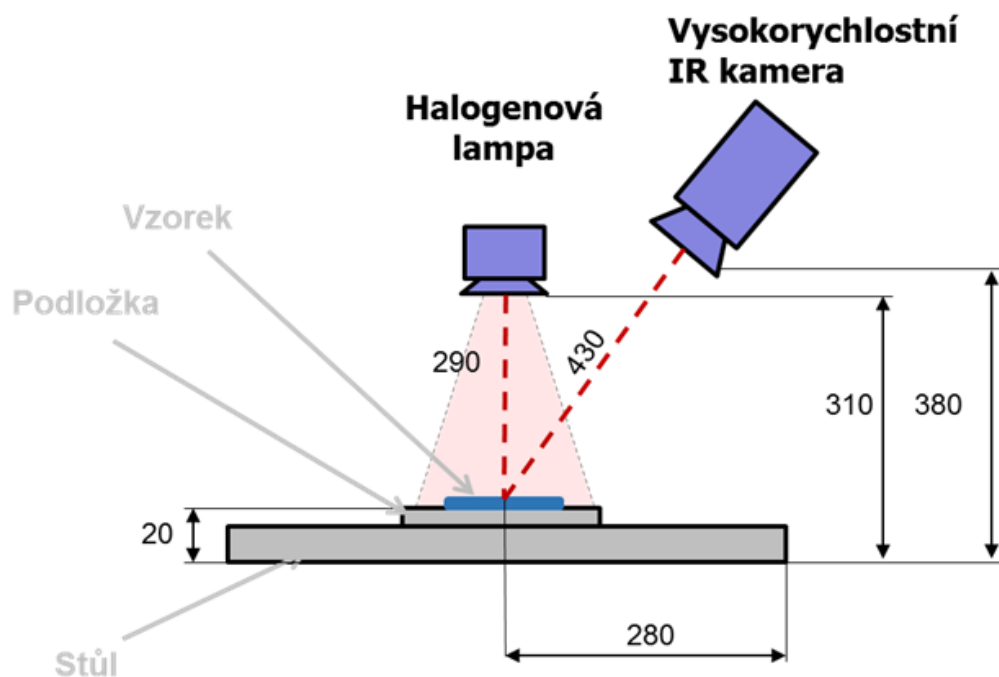
Frekvence kamery	100 Hz
Doba záblesku	3-5 ms
Počet snímků	1000

Tyto parametry byly zvoleny na základě předchozích testů.

Dále je třeba nastavit parametry evaluace. V softwaru od Automation Technology je na výběr ze dvou metod TSR, a to E-Model a Root Model. Rozdíl mezi těmito metodami je v použitém proložení tepelné odezvy na pulz. V obou se poté volí, kolikátou derivaci chce uživatel zobrazit. Případně lze využít Pulse Phase algoritmu (PPT) ve variantě phase či amplitude. Fázový signál má oproti amplitudovému tu výhodu, že není do takové míry ovlivněn nerovnoměrným ohřevem.

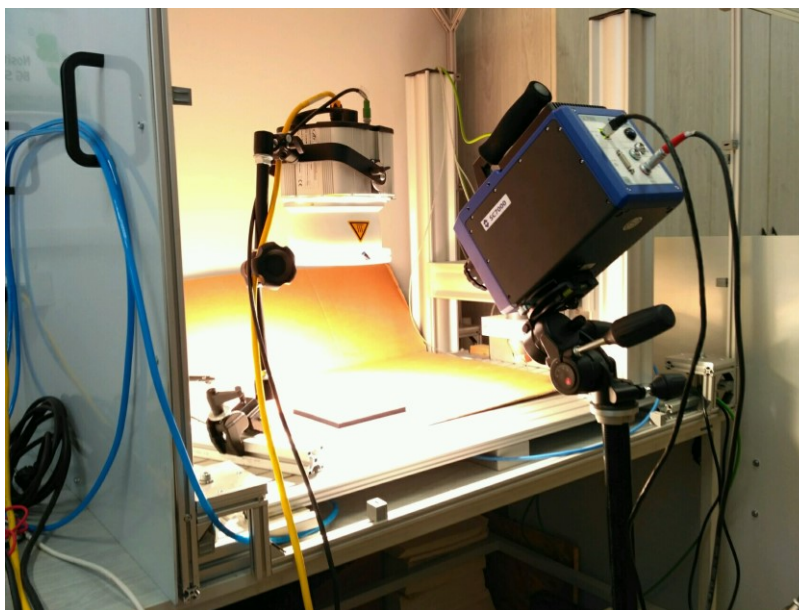
### 3.3.2 Halogen Lock In

Zdrojem buzení byla halogenová lampa. Na *Obr. 15* je znázorněna konfigurace umístění jednotlivých prvků měřicí soustavy. Rozměry jsou udány v mm.



Obr. 15: Konfigurace - Halogen Lock In

Fotografie z měření je uvedena na Obr. 16.



Obr. 16: Fotografie z měření - Halogen Lock In

U Lock In metody se nastavuje frekvence kamery, doba trvání jedné periody osvitu, počet period, tvar budícího signálu. Snímá se celý průběh měření (tj. i osvětlení). Tvarem budícího signálu může být sinus, obdélník, trojúhelník. Při měření byl snížen výkon osvitu na 80 %. Při 100% výkonu se články výrazně zahřívaly. Parametry nastavení měření jsou v Tab. 4.

Tab. 4 Parametry měření Halogen Lock In

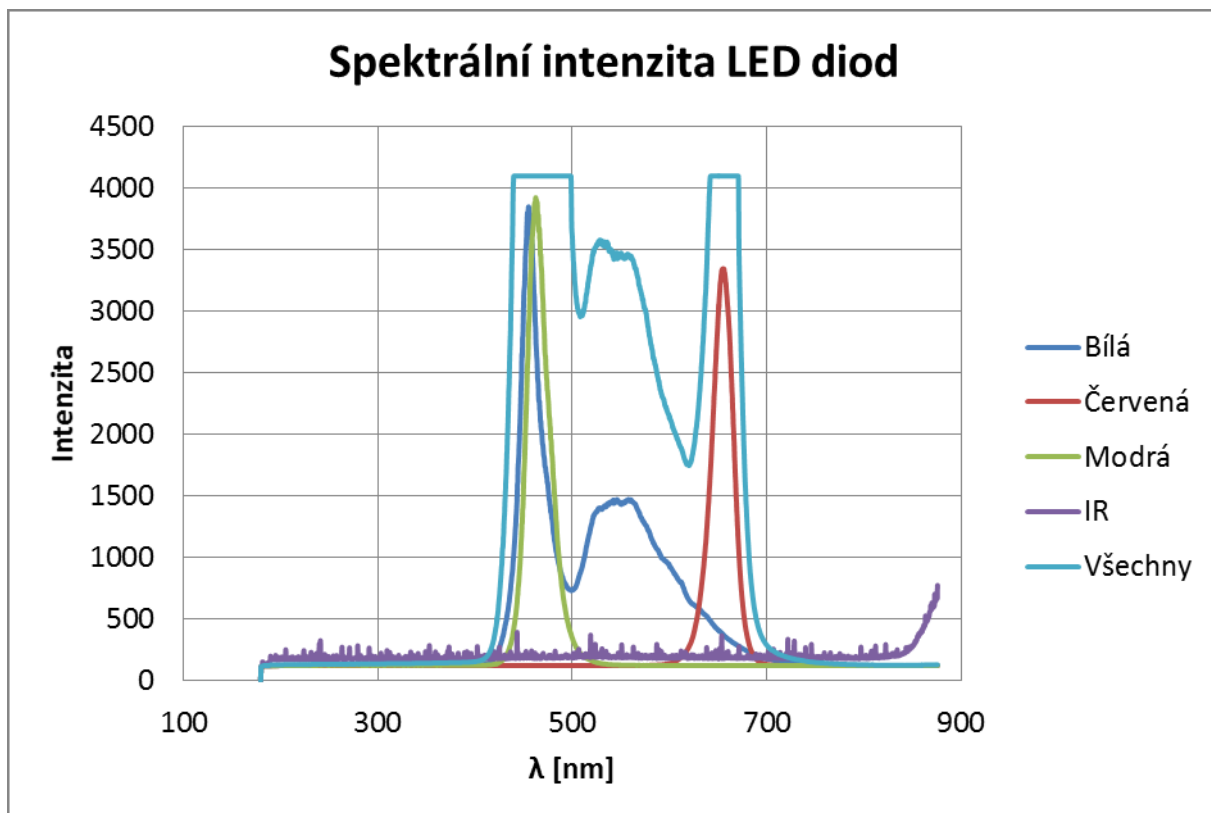
Parametry nastavení měření

Frekvence kamery	50 Hz
Doba jednoho osvitu	2 s
Počet period	10
Tvar signálu	sinus

Je možné si vybrat ze dvou vyhodnocení, a to Harmonic Approximation a DFT. U obou lze zobrazit buď fázový, nebo amplitudový signál.

### 3.3.3 LED Lock In

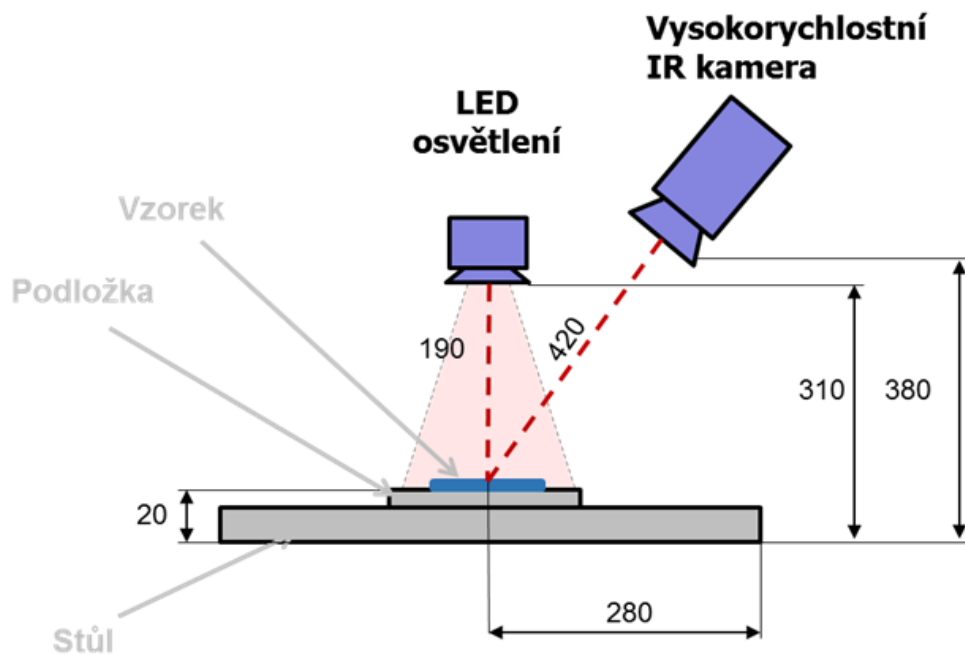
Zdroj buzení se skládá ze 196 pravidelně uspořádaných LED diod různých vlnových délek (modrá, červená, IR, bílá) s celkovým výkonem 1238 mW. Diody jsou rozmístěny ve čtverci o hraně 12,5 cm a výsledná plošná hustota výkonu je 79,23 W/m<sup>2</sup>. Na Obr. 17 je znázorněno spektrum LED osvětlení.



Obr. 17: Spektrální složení LED osvětlení

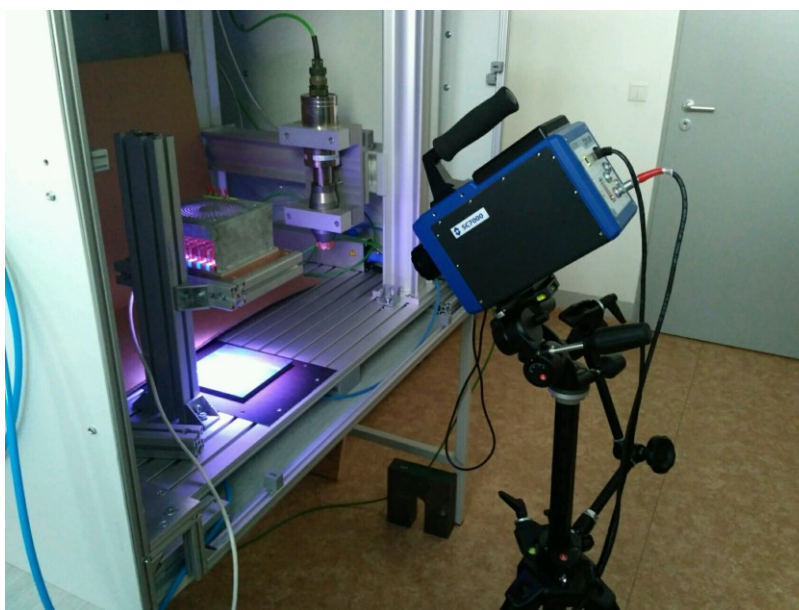
Odchylka ve výkonu je pod 5 %.

Na Obr. 18 je znázorněna konfigurace umístění jednotlivých prvků měřicí soustavy. Rozměry jsou udány v mm.



Obr. 18: Konfigurace - LED Lock In

Na Obr. 19 lze vidět fotografii z měření.



Obr. 19: Fotografie z měření - LED Lock In

Možnosti nastavení měření a vyhodnocení se neliší od měření metodou Halogen Lock In. Díky odlišnému světelnému zdroji se liší nastavení parametrů měření. Parametry jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Parametry měření LED Lock In  
Parametry nastavení měření

Frekvence kamery	25 Hz
Doba jednoho osvitu	5 s
Počet period	20
Tvar signálu	sinus

### 3.3.4 LED Lock In Ref a LED Solar Check

Metoda LED Lock In Ref se liší od metody Lock In tím, že před aplikováním algoritmu DFT či Harmonic Aproximation je celý termogram přepočítán vůči nějaké referenci. Touto referencí může být budicí signál, nebo se může odkazovat sám na sebe tj. Selfref. Je možné dále nastavit parametr vyhodnocení Single Phase nebo Dual Phase v režimech X nebo Y.

Solar Check pracuje na stejných algoritmech jako Lock In Ref. Rozdíl je, že umožňuje získávat další informace o solárních článcích. Tento modul by měl umět počítat defekty na článek a rozdělovat je dle velikosti. Tato funkcionalita však během měření nefungovala.

Jak Lock In Ref tak i Solar Check byly realizovány ve formě online. Ta umožňuje nechat si výsledky vyobrazovat v reálném čase. V tomto případě se nedá uložit termografická sekvence. Neustále probíhá vyhodnocení (je aplikován vybraný algoritmus) a uživateli je zobrazen pouze nejnovější snímek vyhodnocení. Výhodou tohoto režimu je, že se může použít vyšší vzorkovací frekvence. Online forma je vhodná zejména pro dlouhá měření. Nevýhodou je, že během měření nelze měnit parametry vyhodnocení.

Rozmístění konfigurace bylo stejné jako v případě měření metodou LED Lock In.

Parametry měření jsou v Tab. 6. Měření bylo ukončeno podle toho, v jakém čase se už výsledná evaluace nezlepšovala. Většinou stačilo pro získání dostatečně ostré evaluace 20 000 – 25 000 snímků, tj. 6,6 – 8,33 min. Dle toho se také lišil počet period.

Tab. 6 Parametry měření Solar Check, Lock In Ref  
Parametry nastavení měření

Frekvence kamery	50 Hz
Doba jednoho osvitu	3 s
Počet period	-
Tvar signálu	sinus

### 3.4 Kvantitativní analýza termografických měření pomocí CNR

Pro kvantitativní analýzu výsledků inspekce termografických měření v současné době neexistuje žádná norma. V některých publikacích, např. v [34][35][36] se začíná využívat parametru CNR (Contrast To Noise Ratio) pro kvantitativní analýzu.



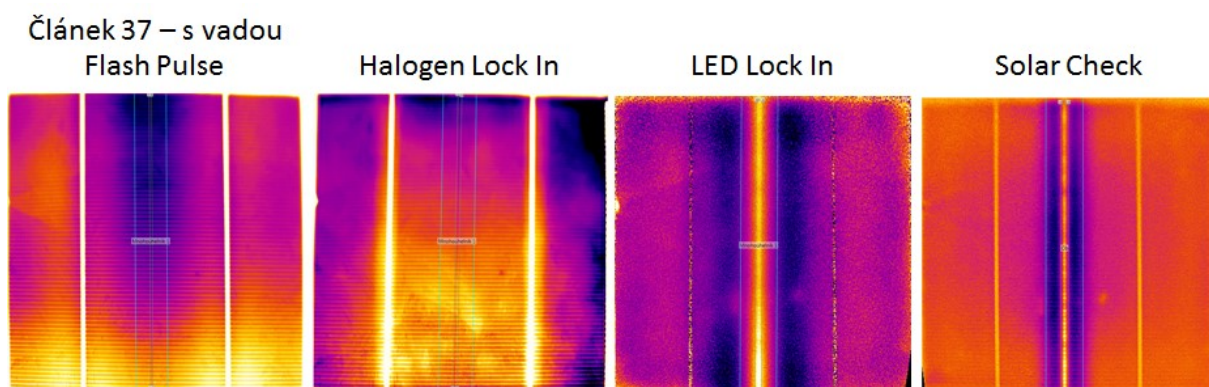
CNR je parametr, který udává, jak se liší sledovaná oblast (defekt, nehomogenita, ...) od jejího pozadí. Výpočet funguje tak, že zkoumaná oblast je označena jako oblast signálu a okolí této zkoumané oblasti je označeno jako šum. V rovnici je uveden vzorec pro výpočet.

$$CNR [dB] = 20 * \log\left(\frac{|\bar{A}_S - \bar{A}_N|}{\sigma_N}\right) \quad (4.4.1)$$

V čitateli je rozdíl průměrných hodnot signálu a šumu. Jmenovatel reprezentuje směrodatnou odchylku šumu.

V současné době neexistují pravidla, jak vybírat oblast signálu a šumu.

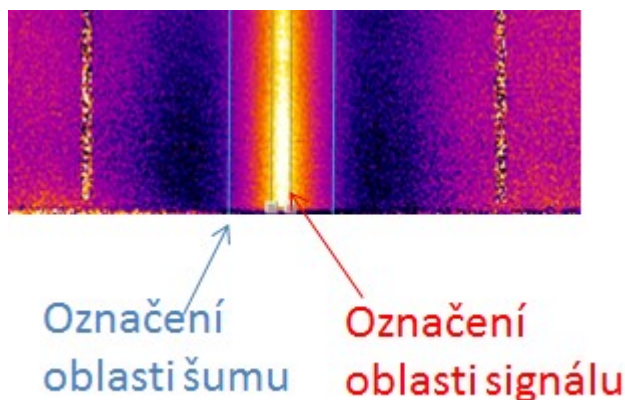
V této kapitole je ukázáno na článku 37 s uměle vytvořenou vadou, jakým způsobem se může vypočítat CNR. Zároveň jsou navzájem porovnány výsledky CNR jednotlivých termografických měření. K výpočtu parametru CNR byl použit software LabIR, vyvíjený NTC. Tento software má široké možnosti využití a je speciálně navržen pro termografická měření. Jednou z jeho mnoha funkcí je také výpočet CNR.



Obr. 20: Výběr oblastí CNR

Jako oblast signálu je označen pruh vytvořený laserem. Pro každé vyhodnocení je tato oblast jinak velká. Na vyhodnocení Flash Pulse a Halogen Lock In je vidět pouze velmi úzká čára. V případě LED Lock In a Solar Check se jedná o pruh, viz Obr. 20.

Modré čáry na vyhodnocení ukazují rozšíření směrem vně o 20 pixelů. Z této oblasti se odebere oblast signálu a následně jsou vypočítány parametry šumu. Ukázka výběru je na Obr. 21.



Obr. 21: Ukázka výběru oblastí – CNR

Pro výpočet CNR byly použity dvě rozšíření, a to o 10 pixelů a o 20 pixelů. Výsledky CNR jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 CNR článek 37

Článek 37 - tabulka CNR

		Flash Pulse	Halogen Lock In	LED Lock In	Solar Check
Artefakt 1 - CNR [dB]	Rozšíření o 10 pixelů	-16,41	-20,88	7,11	10,80
	Rozšíření o 20 pixelů	-15,19	-19,21	8,21	11,36

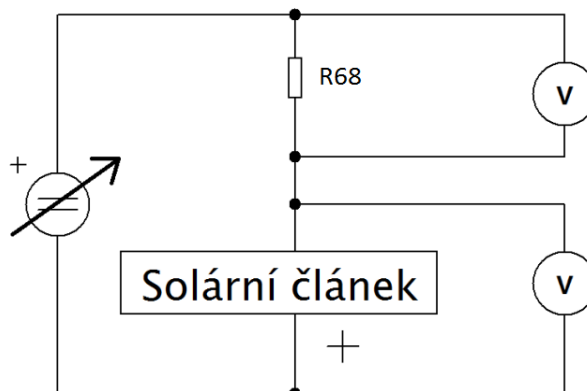
Z Tab. 7 lze zjistit, že nejvyšší CNR je u článku 37 získáno při inspekci pomocí LED Lock In a Solar Check. Od 4 dB výše se vada považuje za velmi jasně indikovanou. To znamená, že těmito metodami je vada jednoznačně zachytitelná.

Výpočet CNR byl uveden pouze jako ukázka možného kvantitativního vyhodnocení aktivní termografie. Ostatní články nejsou pomocí CNR hodnoceny.

### 3.5 VA charakteristiky

Měření VA charakteristiky probíhalo na speciálně vytvořeném zařízení pro testování solárních článků. Zařízení bylo zapůjčeno pracovištěm NTC při ZČU. Jako zdroj osvětlení článku bylo použito pole LED diod. Pro nakontaktování článku byly použity pružinové měřicí hroty, na které se článek položil busbary a přiklopil se. Bez přiklopení by nemusela být vyvinuta stejná přítlačná síla na hroty a díky tomu by se mohl měnit přechodový odpor mezi článkem a měřicími hroty.

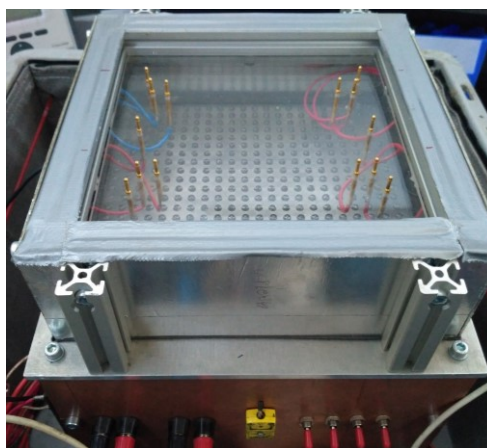




Obr. 22: Schéma zapojení - měření VA charakteristiky

VA charakteristika byla měřena dle schématu zapojení – Obr. 22. Změnou hodnoty na zdroji se postupně snižovalo napětí na článku až na 0 V (Při této hodnotě napětí se odečítá  $I_{sc}$ ). Proud na článku byl dopočítán přes hodnotu napětí na odporu. Napětí na článku bylo snímáno voltmetrem.

Použitý světelný zdroj nesplňoval podmínky STC. Vyzářený výkon byl téměř 13krát nižší, než udává norma. LED osvětlení dodává plošnou hustotu výkonu  $79,23 \text{ W/m}^2$ . Díky použití LED diod (studené světlo, malý výkon) nedocházelo k ohřevu článků, díky tomu nebylo třeba regulovat jejich teplotu. Fotografie použitého zařízení pro měření VA charakteristik je na Obr. 23.



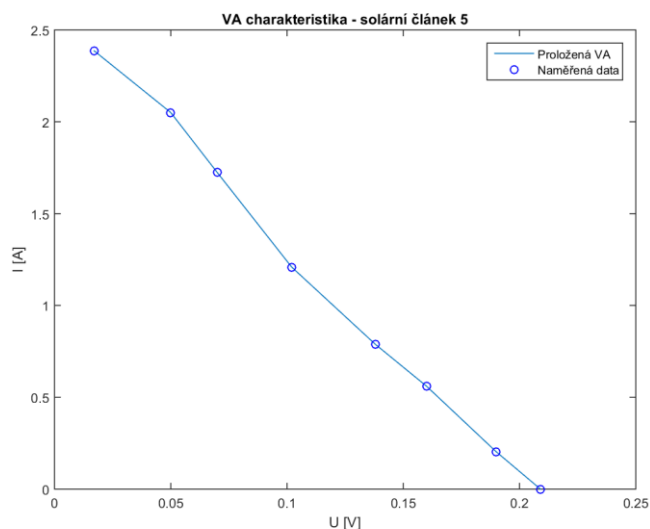
Obr. 23: Fotografie zařízení pro měření VA charakteristik

Měření VA charakteristik v rámci tohoto měření sloužilo především k porovnání toho, jaký vliv mají uměle vytvořené vady na VA charakteristiku. Na absolutních číslech tedy nezáleží, záleží na zjištěném rozdílu mezi články s vadou/bez vady. Proto není problém, že nejsou splněny podmínky STC.

Aby byly získány porovnatelné hodnoty pro mezilaboratorní srovnání, bylo by třeba počítat i s odpory přívodních kabelů, měřicích hrotů, bylo by také potřeba mít světelný zdroj, který by se blížil spektru dle STC. Profesionální přístroje dokáží získat několik desítek VA charakteristik během několika málo sekund. Díky tomu jsou schopné regulovat různé výkyvy v měření, průměrovat hodnoty, apod. Průměrně měření jedné VA charakteristiky provedené dostupným vybavením trvalo zhruba 30 s.

Díky všem těmto důvodům nejsou výsledné VA charakteristiky přepočítány na hodnoty, které by nastaly při STC.

Během měření se zjistilo, že články ze sady 1 nejsou dostatečně vybuzeny světelným zdrojem. Charakteristiky měly tvar přímky, ukázka výsledků měření VA charakteristiky je na Obr. 24. V tomto stavu je měření extrémně náchylné na jakékoliv výkyvy např. teplotní, nebo způsobené nestabilitou zdroje, či jiné. [4] Z tohoto důvodu nebyly dále charakteristiky článku ze sady 1 měřeny. Bylo by prakticky nemožné porovnávat články s vadou a bez vady, protože mnohem větší vliv by měly nejistoty měření.

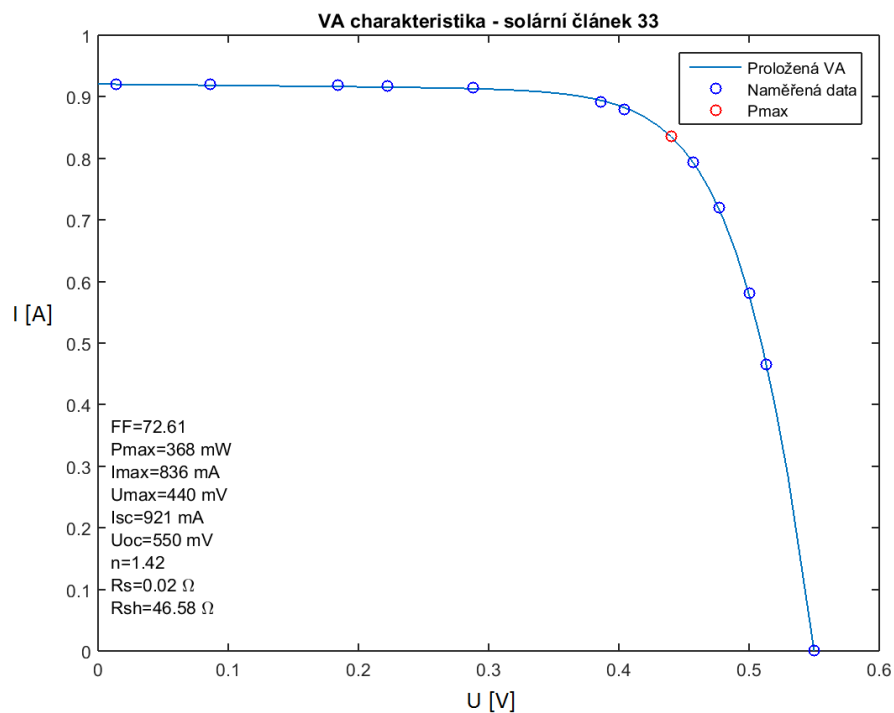


Obr. 24: VA charakteristika článku 5

U článků ze sady 2 měly charakteristiky očekávaný tvar. VA charakteristiky u článků ze sady 2 byly měřeny třikrát. Bylo to proto, aby se zjistilo, jestli se dají měření zopakovat a měřicí metoda je dostatečně přesná.

Naměřené hodnoty byly proloženy způsobem, který je popsán v kapitole 2.2.2. Pomocí tohoto algoritmu byly i extrahovány parametry  $R_S$ ,  $R_{SH}$  a  $n$ . Bod  $P_{MAX}$  se vypočítá tak, že se vynásobí jednotlivé napětí a proudy z VA charakteristiky. A poté se nalezne ten s nejvyšší hodnotou. Po nalezení  $P_{MAX}$  lze velmi snadno spočítat FF dle rovnice 1.3.3.

Na Obr. 25 je zobrazena ukázka změřené VA charakteristiky s dopočítanými parametry článku.



Obr. 25: VA charakteristika článku 33 - 1. měření

Z Obr. 25 lze vidět, že proud změřený jako  $I_{SC}$  ve skutečnosti nebyl změřen při nulovém napětí, nicméně v části charakteristiky, kde se napětí blíží nule, je proud konstantní. Z toho důvodu lze proudy v této části charakteristiky považovat za  $I_{SC}$ .

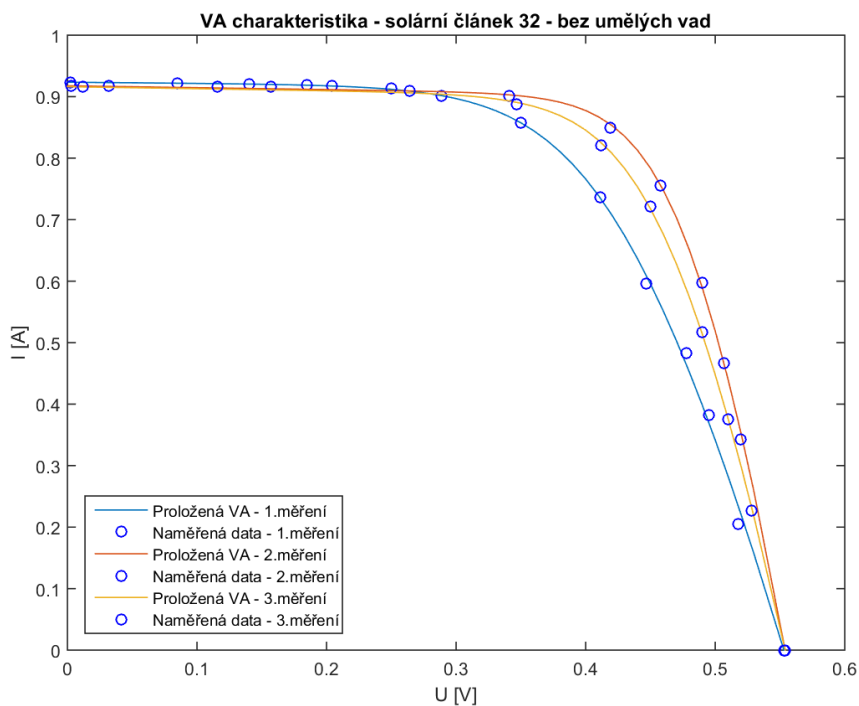
V Tab. 8 jsou znázorněny vypočítané parametry z opakovaných měření pro články bez uměle vytvořené vady.

Tab. 8 Extrahované parametry - bez umělých vad

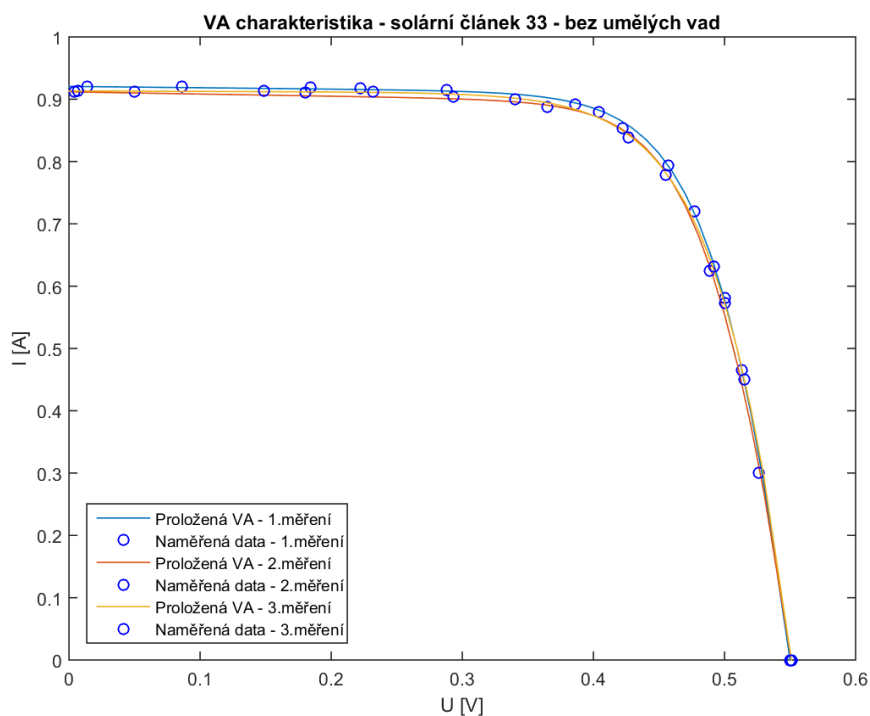
Měření 1							
Vzorek	32	33	34	35	36	37	38
$P_{MAX}$ [mW]	308	368	312	340	354	367	354
$I_{MAX}$ [mA]	811	836	822	830	842	854	843
$U_{MAX}$ [mV]	380	440	380	410	420	430	420
$I_{SC}$ [mA]	924	921	922	938	916	918	926
$U_{oc}$ [mV]	553	550	550	549	547	550	550
n [-]	1,75	1,42	1,43	1,43	1,19	1,03	0,76
$R_s$ [ $\Omega$ ]	0,09	0,02	0,10	0,07	0,05	0,05	0,09
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	58,64	46,58	40,53	32,18	32,93	38,39	15,59
FF [-]	0,60	0,73	0,62	0,66	0,71	0,73	0,69
Měření 2							
Vzorek	32	33	34	35	36	37	38
$P_{MAX}$ [mW]	359	361	376	372	357	349	357
$I_{MAX}$ [mA]	836	821	835	845	830	831	830
$U_{MAX}$ [mV]	430	440	450	440	430	420	430
$I_{SC}$ [mA]	918	912	919	928	909	916	916
$U_{oc}$ [mV]	554	551	555	547	546	549	555
n [-]	1,20	1,31	1,58	1,39	1,35	1,37	1,43
$R_s$ [ $\Omega$ ]	0,05	0,03	0,01	0,02	0,03	0,05	0,04
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	32,94	29,19	72,04	33,02	32,29	25,58	44,87
FF [-]	0,71	0,72	0,74	0,73	0,72	0,69	0,70
Měření 3							
Vzorek	32	33	34	35	36	37	38
$P_{MAX}$ [mW]	340	361	363	371	356	358	334
$I_{MAX}$ [mA]	829	819	826	844	829	832	815
$U_{MAX}$ [mV]	410	440	440	440	430	430	410
$I_{SC}$ [mA]	916	913	916	926	906	922	916
$U_{oc}$ [mV]	554	551	555	546	546	549	553
n [-]	1,39	1,68	1,38	1,40	1,37	1,25	1,30
$R_s$ [ $\Omega$ ]	0,07	0,01	0,03	0,02	0,03	0,05	0,08
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	30,92	154,05	44,96	37,91	42,43	25,45	29,96
FF [-]	0,67	0,72	0,71	0,73	0,72	0,71	0,66

Z výsledků je patrné, že u některých článků se od sebe VA charakteristiky lišily. Rozdíly jsou vidět především na článku 32 a 34. Tyto odchylky jsou pravděpodobně způsobeny tím, že články 32 a 34 při měření 1 byly měřeny jako první. LED osvětlení nemuselo být ustáleno

a VA charakteristiky nebyly změřeny tak rychle jako zbylé charakteristiky, mohl se tedy projevit ohřev článku způsobený protékajícím proudem. Naopak u článku 33 a 36 se VA charakteristiky od sebe výrazně nelišily. Na *Obr. 26* jsou vidět VA charakteristiky článku 32 a na *Obr. 27* článku 33.



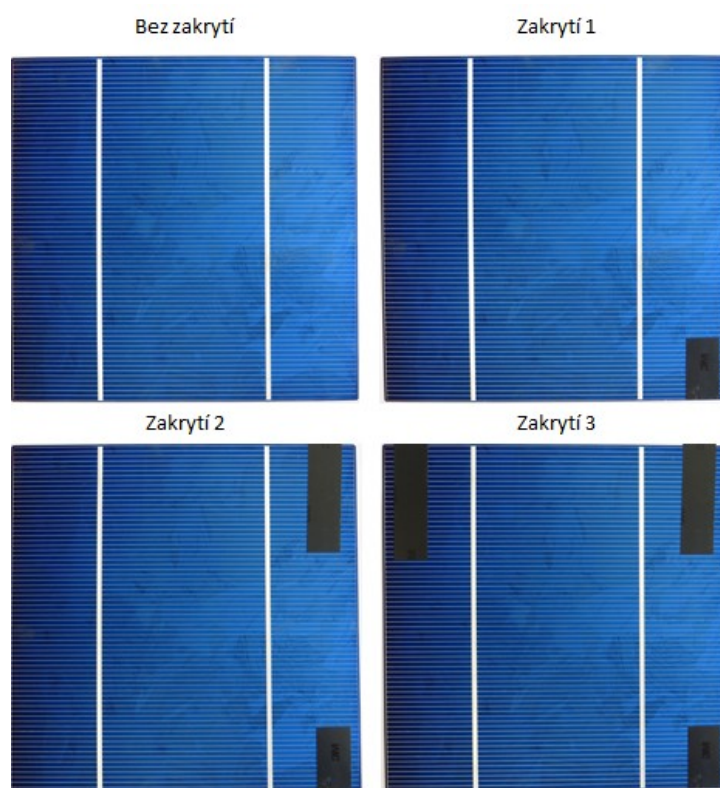
*Obr. 26: VA charakteristika solárního článku 32 - bez umělých vad*



*Obr. 27: VA charakteristika solárního článku 33 - bez umělých vad*

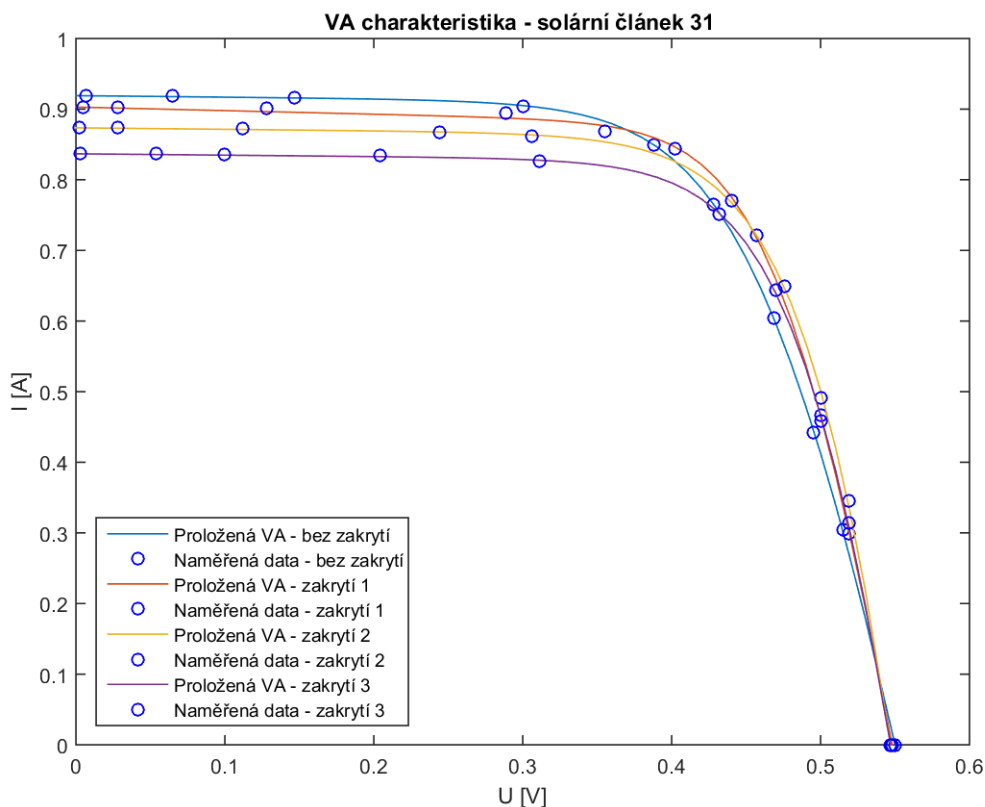
Při bližším zkoumání získaných parametrů u článku 33, lze vyzorovat velký rozdíl při opakovaných měřeních odporu  $R_{SH}$ . Parametry  $n$ ,  $R_S$  a  $R_{SH}$  jsou získány tak, že se hledá nejlepší proložení. Tím, že se změní  $n$ , se změní  $R_S$  a  $R_{SH}$ ; aby byly tyto parametry porovnatelné, bylo by třeba nastavit  $n$  konstantní. Toto by byl zjednodušený postup, kde by se místo tří parametrů řešily dva.

Z důvodu toho, že se na článku 32 ukazuje, že měření VA charakteristiky nemusí být dostatečně přesné, bylo otestováno, jak se projeví to, že bude část článku poškozena. Pro účely tohoto testu bylo bráno v úvahu, že při poškození není z celého článku odebírána energie např. poškozením fingerů, prasknutím části článku. Toto poškození bylo simulováno tak, že se část článku zakryla černou lepenkou. Postup zakrývání článku je na *Obr. 28*.



*Obr. 28: Zakrývání článku*

Naměřené VA charakteristiky jsou na *Obr. 29*.



Obr. 29: VA charakteristika - postupné zakrývání článku

Z grafů lze poznat, že se zvyšující se plochou zakrytí klesá hodnota  $I_{sc}$ . V Tab. 9 jsou extrahované parametry z VA charakteristik.

Tab. 9 Extrahované parametry - postupné zakrývání

Stav	Bez zakrytí	Zakrytí 1	Zakrytí 2	Zakrytí 3
$P_{MAX}$ [mW]	333	345	339	325
$I_{MAX}$ [mA]	811	822	788	757
$U_{MAX}$ [mV]	410	420	430	430
$I_{SC}$ [mA]	919	903	874	837
$U_{oc}$ [mV]	550	548	547	547
$n$ [-]	1,58	1,24	1,57	1,45
$R_s$ [ $\Omega$ ]	0,06	0,05	0,02	0,03
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	47,31	19,89	48,81	52,71
$FF$ [-]	0,66	0,70	0,71	0,71

Z tabulky lze vypočítat, že při měření VA charakteristiky při tom, když byl článek nezakrytý, je  $FF$  nejnižší. Tento trend by neměl nastat.  $P_{MAX}$  i  $FF$  by mělo být v tomto případě nejvyšší. S nejvyšší pravděpodobností byl tento jev způsoben tím, že měření VA

charakteristiky bez zakrytí bylo realizováno jako první a díky tomu nebyl zdroj osvětlení ustálen.

Pro doplnění je uvedena i tabulka vypočtených parametrů z opakovaných měření pro články s uměle vytvořenými vadami. Jedná se o *Tab. 10*.

*Tab. 10 Extrahované parametry - umělé vady*

		Měření 1						
Vzorek	32	33	34	35	36	37	38	
$P_{MAX}$ [mW]	300	189	262	307	130	266	319	
$I_{MAX}$ [mA]	731	631	794	808	464	666	778	
$U_{MAX}$ [mV]	410	300	330	380	280	400	410	
$I_{SC}$ [mA]	875	853	921	932	721	910	915	
$U_{OC}$ [mV]	545	549	543	548	481	528	550	
$n$ [-]	1,52	0,98	0,72	0,96	2,04	1,78	2,46	
$R_S$ [ $\Omega$ ]	0,06	0,33	0,22	0,13	0,25	0,02	0,03	
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	6,42	4,13	9,70	5,66	1,37	2,08	98,43	
FF [-]	0,63	0,40	0,52	0,60	0,38	0,55	0,63	
		Měření 2						
Vzorek	32	33	34	35	36	37	38	
$P_{MAX}$ [mW]	304	213	258	311	154	270	332	
$I_{MAX}$ [mA]	741	645	781	796	495	659	810	
$U_{MAX}$ [mV]	410	330	330	390	310	410	410	
$I_{SC}$ [mA]	875	879	921	932	746	906	922	
$U_{OC}$ [mV]	543	548	544	546	482	531	550	
$n$ [-]	1,51	2,68	0,56	1,32	1,42	1,56	1,85	
$R_S$ [ $\Omega$ ]	0,05	0,19	0,23	0,09	0,19	0,03	0,05	
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	6,16	12,12	5,12	5,75	1,38	2,12	89,60	
FF [-]	0,64	0,44	0,51	0,61	0,43	0,56	0,66	
		Měření 3						
Vzorek	32	33	34	35	36	37	38	
$P_{MAX}$ [mW]	295	182	285	298	161	267	331	
$I_{MAX}$ [mA]	720	588	814	785	504	668	808	
$U_{MAX}$ [mV]	410	310	350	380	320	400	410	
$I_{SC}$ [mA]	875	860	922	929	765	906	919	
$U_{OC}$ [mV]	544	547	543	546	483	530	550	
$n$ [-]	1,89	2,23	0,78	1,36	2,06	1,60	1,84	
$R_S$ [ $\Omega$ ]	0,04	0,28	0,17	0,11	0,12	0,04	0,04	
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	6,89	3,84	7,96	6,25	1,54	2,18	37,01	
FF [-]	0,62	0,39	0,57	0,59	0,44	0,56	0,65	



Z naměřených hodnot lze opět zpozorovat určitý rozptyl mezi jednotlivými měřeními.

Opakovaná měření jednotlivých článků byla zprůměrovaná, aby se snáze a přehledněji porovnal vliv laserem vytvořených vad na VA charakteristiky. Aby bylo možné vytvořit průměry, bylo nutné získat hodnoty proudu ve stejných hodnotách napětí - krok byl zvolen 10 mV. Data byla získána z proložených VA charakteristik. V Tab. 11 jsou vypočtené hodnoty parametrů. Výsledné VA charakteristiky jsou uvedeny ve vyhodnocení po člancích.

Tab. 11 Extrahované parametry z průměrů VA charakteristik

Vzorek	32		33		34		35	
	Bez vady	S vadou	Bez vady	S vadou	Bez vady	S vadou	Bez vady	S vadou
$P_{MAX}$ [mW]	333	295	363	194	343	267	358	294
$I_{MAX}$ [mA]	812	738	825	626	816	786	833	775
$U_{MAX}$ [mV]	410	400	440	310	420	340	430	380
$I_{SC}$ [mA]	919	874	915	862	919	921	931	929
$U_{OC}$ [mV]	554	544	551	548	553	543	547	547
$n$ [-]	1,66	2,55	1,47	2,03	2,12	0,82	2	2,98
$R_S$ [ $\Omega$ ]	0,06	0,01	0,02	0,26	0,02	0,20	0,02	0,04
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	35,13	14,91	47,33	6,08	290,48	10,40	39	45,34
$FF$ [-]	65,40	62,11	72,07	41,11	67,40	53,43	70,30	57,94

Vzorek	36		37		38	
	Bez vady	S vadou	Bez vady	S vadou	Bez vady	S vadou
$P_{MAX}$ [mW]	356	148	358	268	347	315
$I_{MAX}$ [mA]	827	492	831	670	827	750
$U_{MAX}$ [mV]	430	300	430	400	420	420
$I_{SC}$ [mA]	910	743	919	907	920	916
$U_{OC}$ [mV]	546	482	549	530	553	550
$n$ [-]	1,32	2,01	1,22	1,65	1,21	3,62
$R_S$ [ $\Omega$ ]	0,04	0,17	0,05	0,03	0,07	0,04
$R_{SH}$ [ $\Omega$ ]	36,26	1,45	28,06	2,13	25,24	20,74
$FF$ [-]	71,49	41,22	70,93	55,75	68,37	62,51

Ze srovnání je patrné, že po vytvoření vad mají články nižší výkon a zároveň nižší parametr  $FF$ . Vady jsou rozdílné, proto také projev v ostatních parametrech je odlišný. V kapitole Vyhodnocení po člancích jsou tyto parametry podrobněji zhodnoceny.

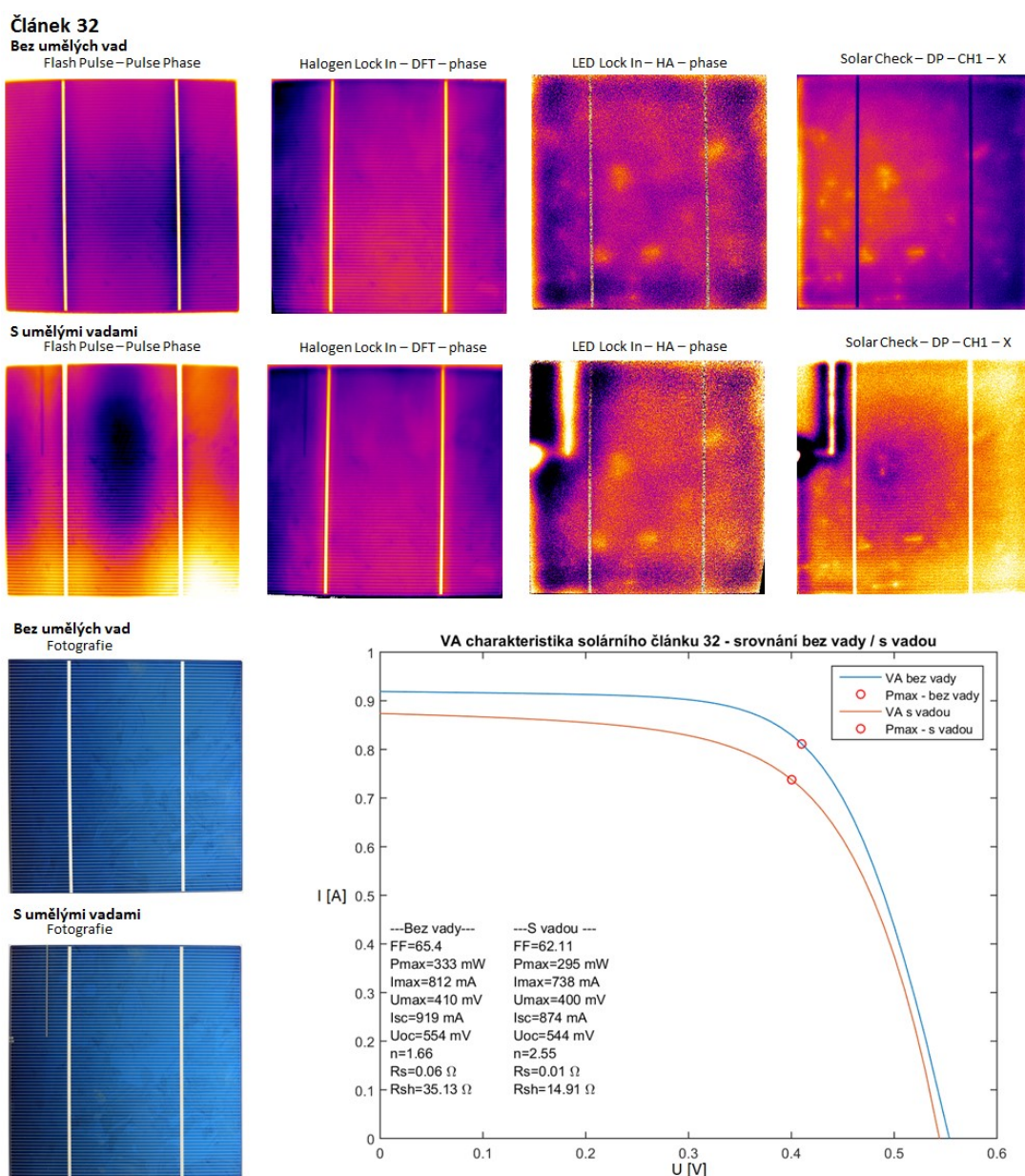
### 3.6 Vyhodnocení po článcích

Z toho důvodu, že u článků ze sady 1 nebylo možné změřit VA charakteristiky, protože byl k dispozici pouze zdroj, který nebyl dostatečně schopen vybudit články, nebyly na tyto články vytvořeny vady (kromě článku 5 a 11). Nebylo by totiž možné porovnávat vliv vady z hlediska elektrických parametrů.

Uměle vytvořené defekty byly realizovány na všech článcích ze sady 2. Aby bylo dodrženo komplexní porovnání (články s/bez umělé vady), jsou v této kapitole uvedeny pouze výsledky ze sady 2.

#### Článek 32

Na Obr. 30 jsou termografické výsledky a VA charakteristiky.



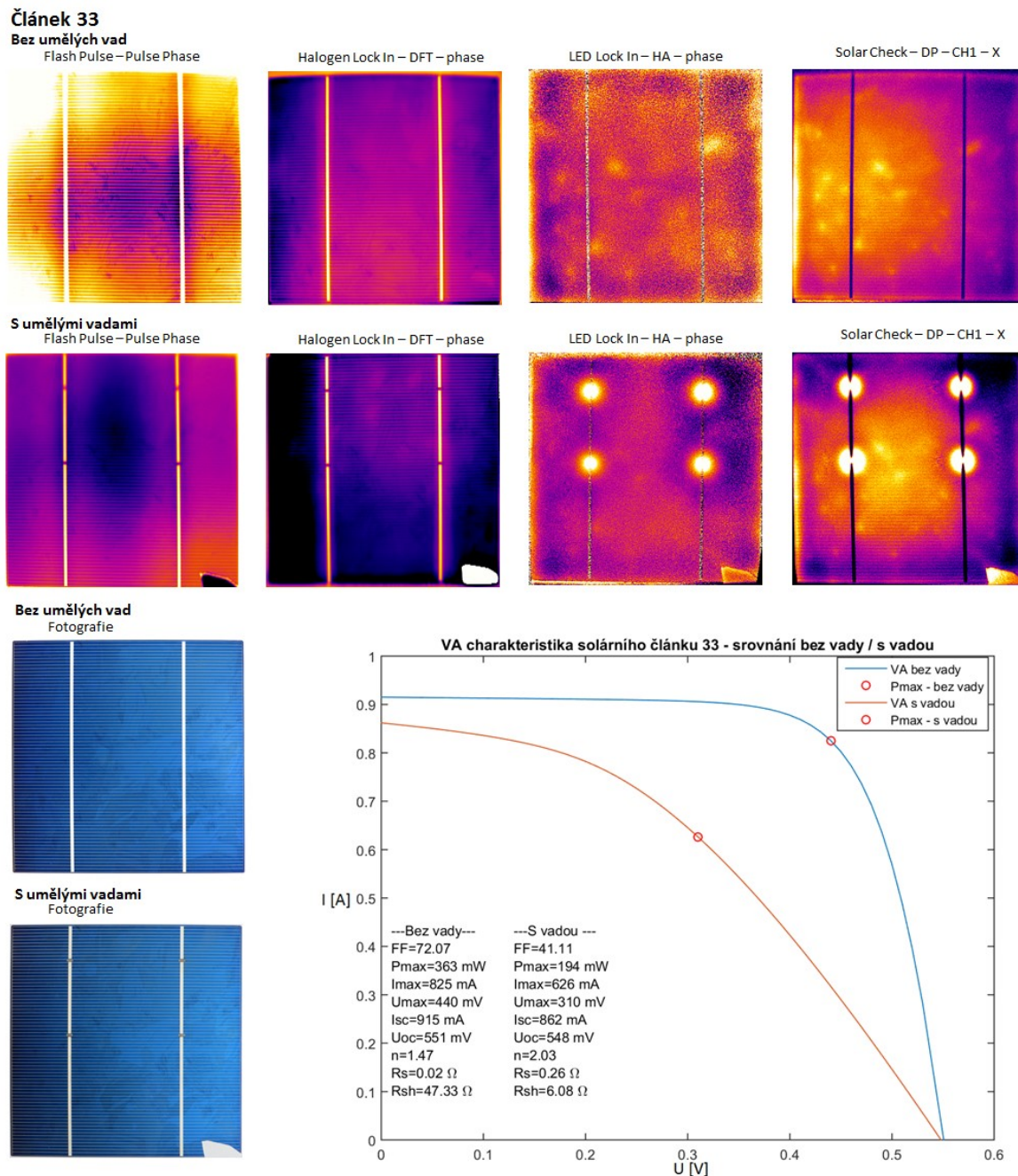
Obr. 30: Solární článek 32 - termografické výsledky, VA charakteristiky a fotografie

Na vyhodnocení pomocí metod LED Lock In a Solar Check lze vidět nehomogenity i před tvorbou umělých vad. V tomto případě se jedná o trhliny na článku, které zásadně neovlivňují elektrické vlastnosti.

Vytvořená vada má simulovat odpojení části článku tím, že se přeruší vodiče (fingery). Vada se nachází v horní části článku u levého okraje. Byl očekáván podobný výsledek jako v případě zakrytí části článku. Tento předpoklad se vyplnil. Hlavní rozdíl je v hodnotě proudu  $I_{sc}$ , který je o 45 mA nižší. Parametr Fill Factor se významně nezměnil. Jedná se o jednu z nejméně závažných vad, které byly vytvořeny. Vada je vidět na všech termografických vyhodnoceních. Nejlépe při použití metody LED Lock In a Solar Check.

## Článek 33

Na Obr. 31 jsou termografické výsledky a VA charakteristiky.



Obr. 31: Solární článek 33 - termografické výsledky, VA charakteristiky a fotografie

Na vyhodnocení pomocí metod LED Lock In a Solar Check lze vidět nehomogenity i před tvorbou umělých vad. V tomto případě se jedná o trhliny na článku, které zásadně neovlivňují elektrické vlastnosti.

Umělá vada simuluje přerušení busbarů na čtyřech místech. Vada je vidět na všech termografických vyhodnoceních a zásadně ovlivňuje elektrický výkon článku. Nejlépe lze vady zpozorovat při použití metody LED Lock In a Solar Check. Rozdíl ve výkonu je téměř

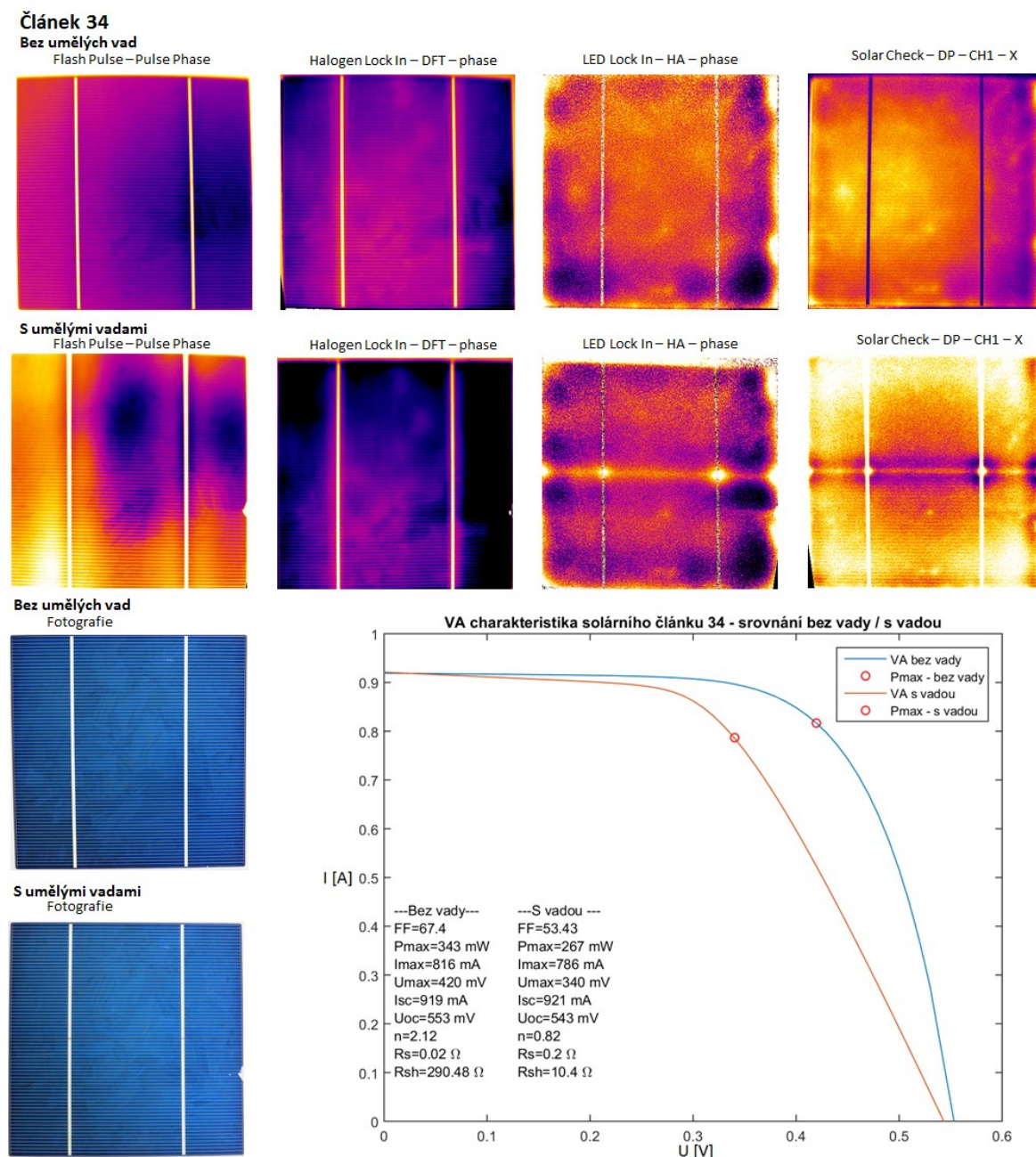


170 mW. Zároveň můžeme pozorovat pokles proudu  $I_{sc}$  a především parametru  $FF$ . Jedná se o jednu z nejvíce závažných vad, které byly vytvořeny.

Z termografických měření lze vypořadovat ulomení kusu článku v pravém dolním rohu. Jedná se o uštipnutí způsobené manipulací se článkem.

### Článek 34

Na Obr. 32 jsou termografické výsledky a VA charakteristiky.



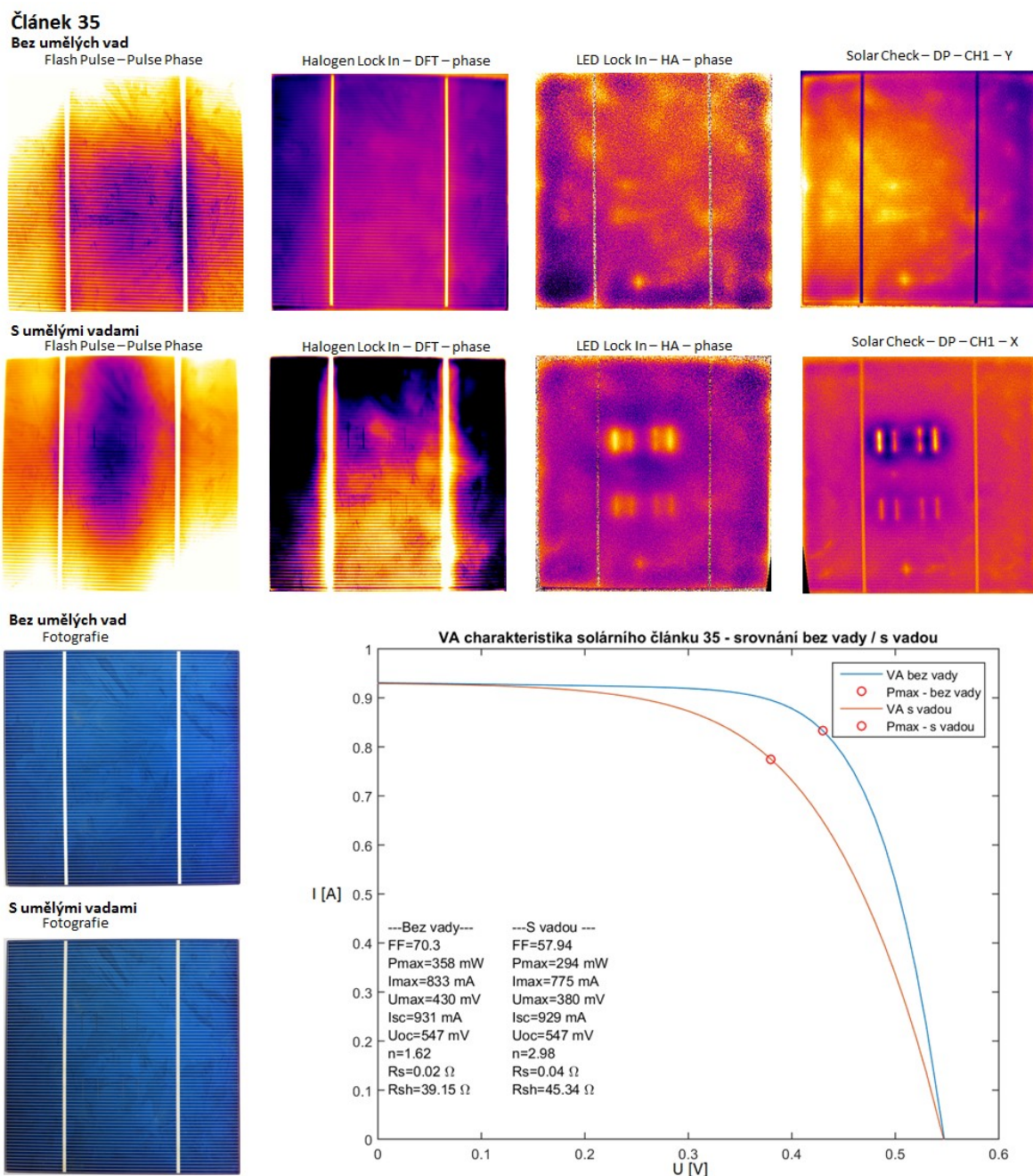
Obr. 32: Solární článek 34 - termografické výsledky, VA charakteristiky a fotografie

Na vyhodnocení pomocí metod LED Lock In a Solar Check lze vidět nevýrazné spíše bodové nehomogenity i před tvorbou umělých vad. V tomto případě se jedná o drobné trhliny na článku, které neovlivňují elektrické vlastnosti.

Umělá vada simuluje přepůlení článku. Vada je vidět pouze metodami LED Lock In a Solar Check. Rozdíl je především ve sklonu počáteční části VA charakteristiky, viz *Obr. 32*. Je snížen i výkon článku o necelých 80 mW. Lze pozorovat, že vada nemá vliv na  $I_{sc}$ . Hodnota napětí  $U_{oc}$  zůstává také přibližně stejná. Snížen je parametr  $FF$ . Z pohledu vytvořených vad se jedná o středně závažnou vadu.

## Článek 35

Na Obr. 33 jsou termografické výsledky a VA charakteristiky.



Obr. 33: Solární článek 35 - termografické výsledky, VA charakteristiky a fotografie

Na vyhodnocení pomocí metod LED Lock In a Solar Check lze vidět nevýrazné spíše bodové nehomogenity i před tvorbou umělých vad. V tomto případě se jedná o drobné trhliny na článku, které neovlivňují elektrické vlastnosti.

Umělá vada simuluje přerušení části fingerů. Každá vada byla vytvořena jinými laserovými parametry. Levá horní vada byla vytvořena s největším tepelným vstupem. Pravá horní vada byla vytvořena s nejmenším tepelným vstupem. Tento jev nelze zpozorovat. Při

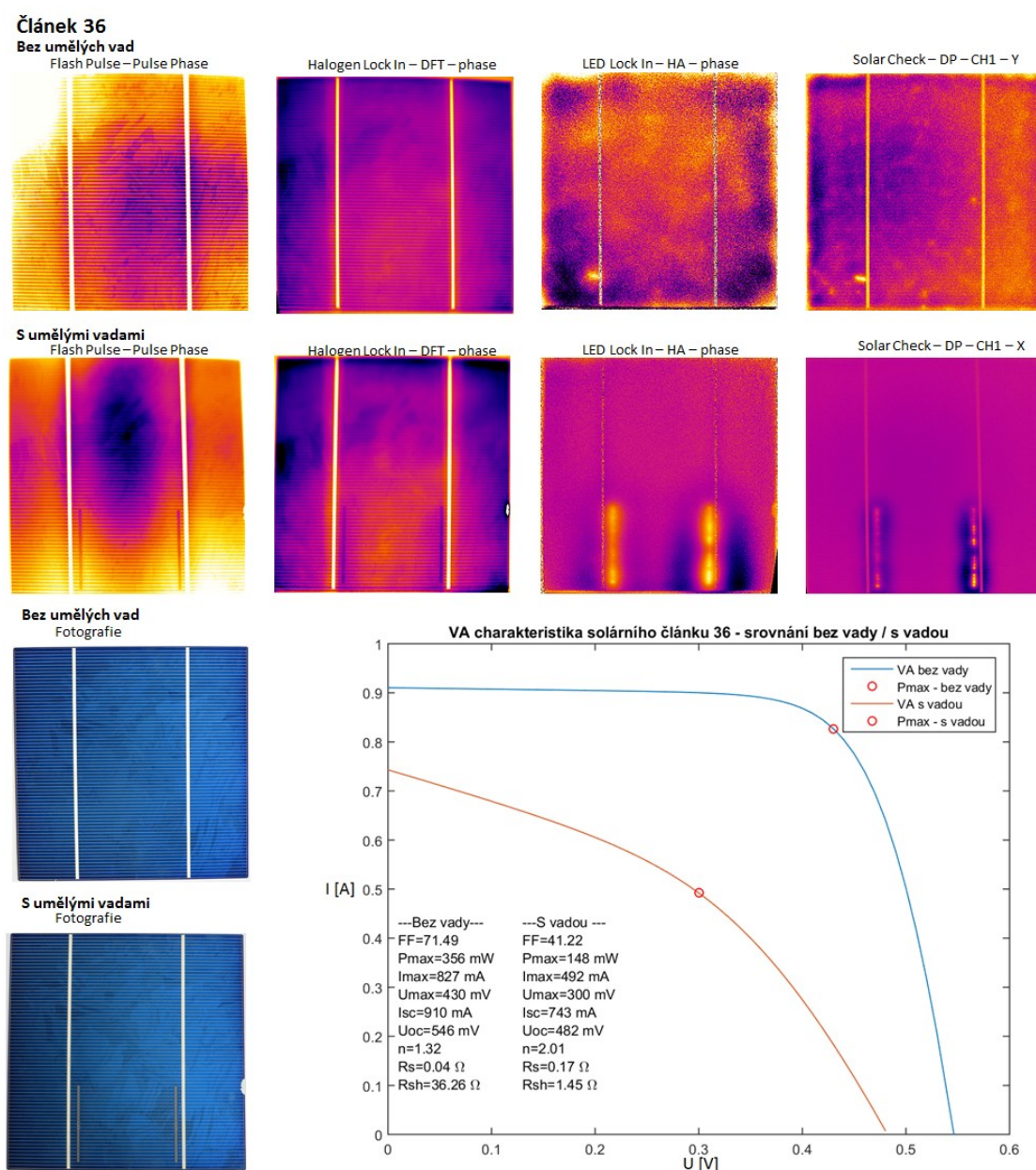


metodě LED Lock In a Solar Check jsou vady nejlépe viditelné. Při použití metody Halogen Lock In jsou vady viditelné hůře. Metoda Flash Pulse vykazuje nejhorší výsledky a vady jsou pouze obtížně viditelné

Z VA charakteristiky lze vidět, že vytvořené vady mají vliv především ve sklonu počáteční části VA charakteristiky. Je snížen i výkon článku o necelých 70 mW. Lze pozorovat, že vada nemá vliv na proud  $I_{sc}$  a napětí  $U_{oc}$ . Snížen je parametr  $FF$ . Z pohledu vytvořených vad se jedná o jednu z nejméně závažných vad.

## Článek 36

Na Obr. 34 jsou termografické výsledky a VA charakteristiky.



Obr. 34: Solární článek 36 - termografické výsledky, VA charakteristiky a fotografie



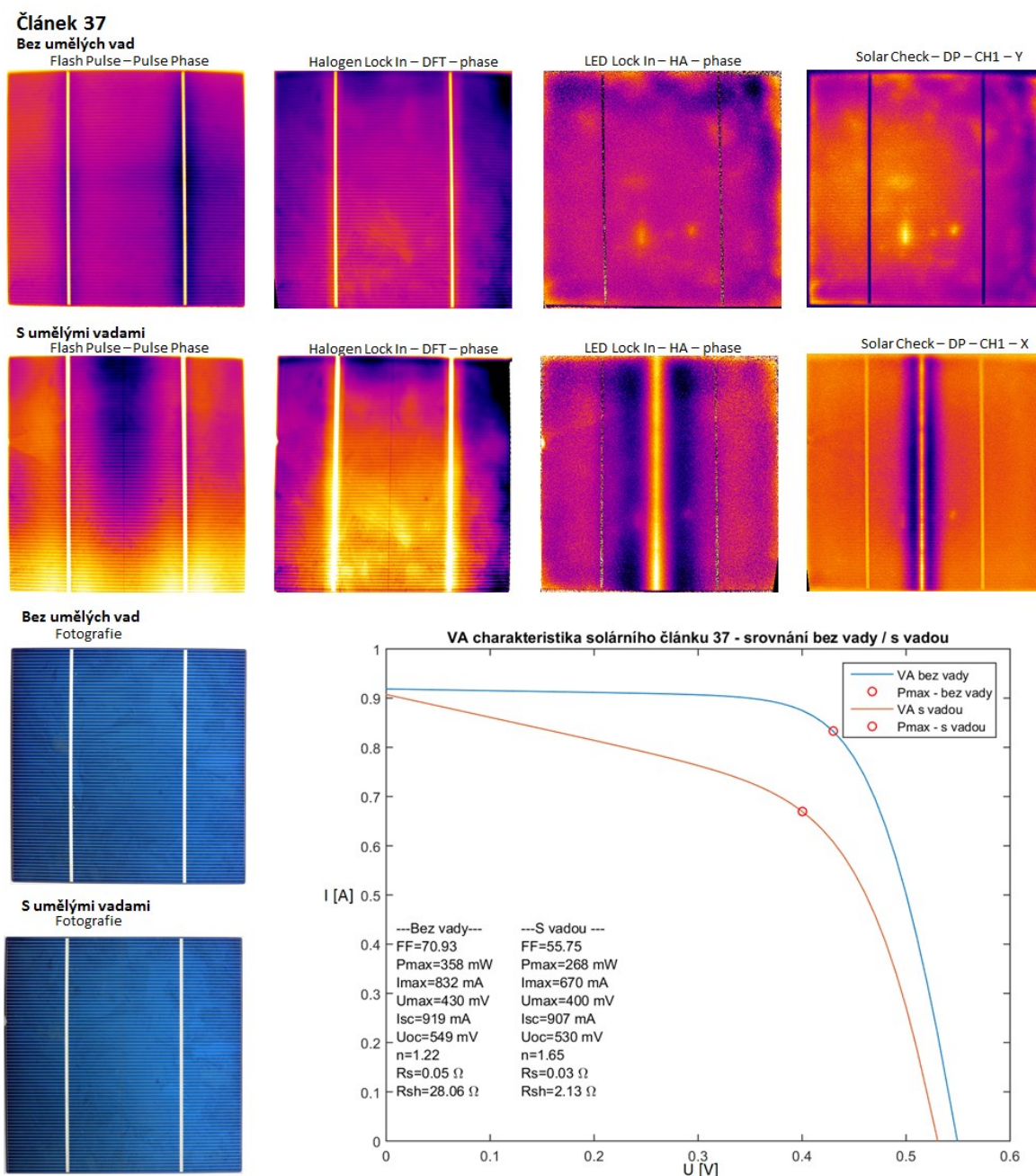
Na vyhodnocení pomocí metod LED Lock In a Solar Check lze vidět nevýrazné, spíše bodové nehomogenity i před tvorbou umělých vad. V tomto případě se jedná o drobné trhliny na článku, které neovlivňují elektrické vlastnosti.

Umělá vada simuluje přerušení velké části fingerů. Jedná se téměř o polovinu článku. Vady lze dobře rozeznat všemi použitými termografickými metodami.

Z VA charakteristiky lze vidět, že vytvořené vady mají výrazný vliv na tvar VA charakteristiky. Je výrazně snížen výkon článku (o více než 50%) i parametr  $FF$ . Lze pozorovat, že vada má vliv na proud  $I_{SC}$  i napětí  $U_{OC}$ . Z pohledu vytvořených vad se jedná o jednu z nejzávažnějších vad.

## Článek 37

Na Obr. 35 jsou termografické výsledky a VA charakteristiky.



Obr. 35: Solární článek 37 - termografické výsledky, VA charakteristiky a fotografie

Na vyhodnocení pomocí metod LED Lock In a Solar Check lze vidět nevýrazné, spíše bodové nehomogenity i před tvorbou umělých vad. V tomto případě se jedná o drobné trhliny na článku, které neovlivňují elektrické vlastnosti.

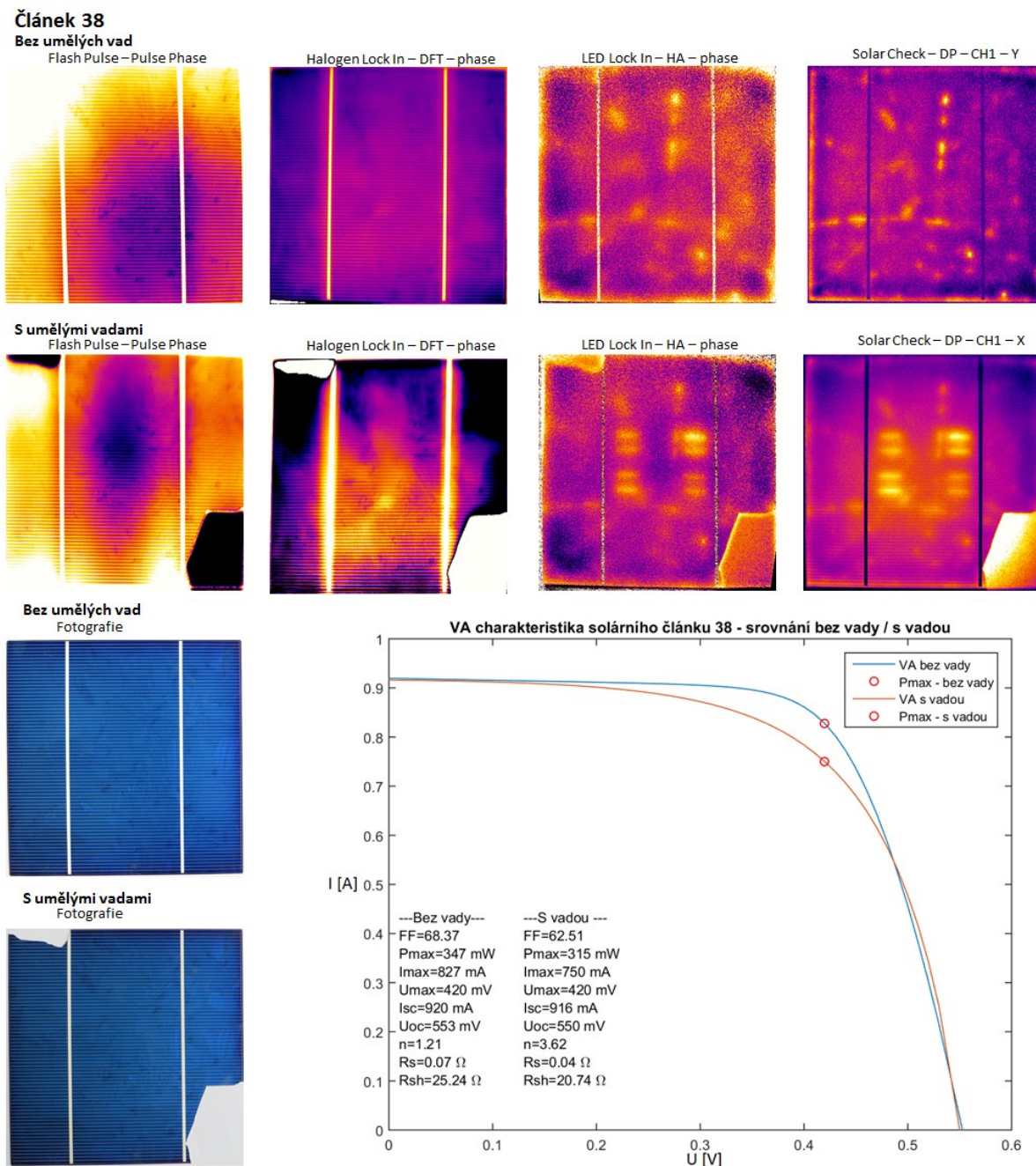
Umělá vada simuluje přepůlení článku. Vada je vidět všemi termografickými metodami. Rozdíl je především ve sklonu závěrečné části VA charakteristiky. Je snížen výkon článku o

90 mW. Lze pozorovat, že vada nemá vliv na proud  $I_{sc}$ . Hodnota napětí  $U_{oc}$  je menší o 19 mV. Snížen je i parametr FF. Z pohledu vytvořených vad se jedná o středně závažnou vadu.

Na článku 34 se také tvořila vada přepálením, ale podle osy y. Z jeho VA charakteristiky lze vidět rozdíl především v počáteční části charakteristiky. U článku 37 je to přesně naopak.

## Článek 38

Na Obr. 36 jsou termografické výsledky a VA charakteristiky.



Obr. 36: Solární článek 38 - termografické výsledky, VA charakteristiky a fotografie

Během měření VA charakteristiky článku s vadami respektive po jejím dokončení článek praskl při vyndávání článku z testovacího zařízení.

Na vyhodnocení pomocí metod LED Lock In a Solar Check lze vidět velmi výrazné nehomogenity i před tvorbou umělých vad. Jedná o poměrně rozsáhlé trhliny na článku, které neovlivňují elektrické vlastnosti.

Umělé vady simulují vytvoření prasklin na článku. Každá vada byla vytvořena jinými laserovými parametry. Vady na článku vpravo nahoře a vlevo dole byly vytvořeny s větším tepelným vstupem než zbylé dvě. Tento jev lze zachytit pomocí termografických metod. Při použití metody Halogen Lock In a Flash Pulse jsou vady obtížně viditelné. Jsou vidět pouze vady vytvořené s největším tepelným vstupem. Při využití metod LED Lock In i Solar Check lze vady velmi dobře vidět. Ulomené části byly v pravém dolním a v levém horním rohu článku, viz *Obr. 36*. To lze vidět při použití všech metod IRNDT i na fotografii.

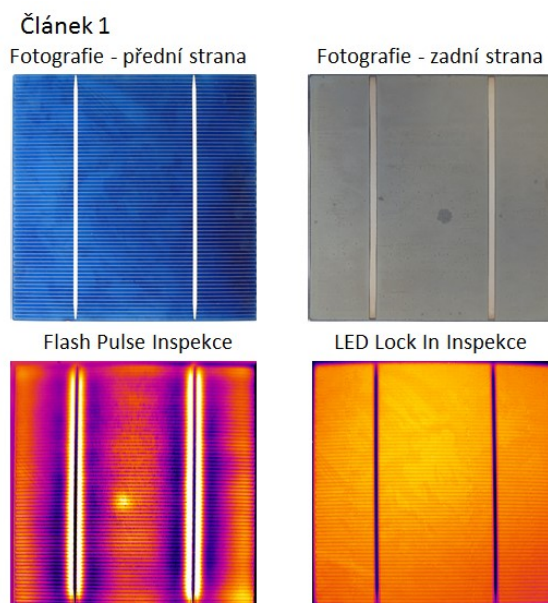
Z VA charakteristiky lze vidět, že vytvořené vady neměly výrazný vliv na elektrické vlastnosti článku. Toto měření bylo realizováno před odlomením částí článku.

### 3.7 Další výsledky

V této kapitole se nachází výsledky zjištěné během provedených experimentů, které nebyly uvedené v předchozí kapitole. Jedná se především o zajímavé výsledky měření článků ze sady 1.

#### 3.7.1 Článek s přirozenou vadou

Při měření metodou Flash Pulse při inspekci článku 1 bylo možné zaregistrovat nehomogenitu, která se nachází na zadní straně článku. Článek měl tuto vadu na sobě již od vybalení z transportní krabičky, kde se nacházel na prvním místě. S největší pravděpodobností se do krabičky dostala tekutina a vytvořila na článku tento artefakt. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí Root Modelu. Při použití ostatních IRNDT metod tato skvrna vidět nebyla. Na *Obr. 37* je ukázáno srovnání metody Flash Pulse a LED Lock In inspekce.



Obr. 37: Vyhodnocení - článek 1

Z tohoto výsledku se jeví metoda Flash Pulse jako metoda schopná zachytit vady na zadní straně článku, případně velmi hluboké vady. Toto zjištění je zejména zajímavé kvůli tomu, že dnes se standardně používají pro testování solárních článků výhradně IRNDT měření založené na Lock In termografii. Hlavní výhodou Flash Pulse metody respektive pulzní termografie je její rychlost. Měření trvá několik sekund, což je značná časová úspora vůči měření metodou Lock In (měření trvá několik desítek minut).

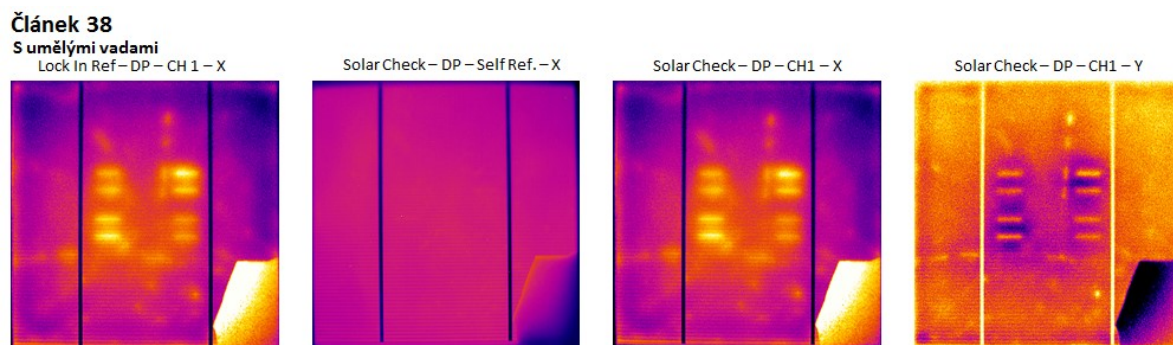
### 3.7.2 Závislost výsledku při metodě Solar Check na algoritmu vyhodnocení

Během měření pomocí metody Solar Check byla snímána jedna termografická sekvence a na ni se aplikovaly různé algoritmy vyhodnocení. Byly použity algoritmy Dual Phase Self Ref. ve variantě X, Dual Phase - Channel 1 ve variantě X a Y a i algoritmus Lock In Ref. Dual Phase ve variantě X.

V kapitole 4.9 se využívalo metody Dual Phase Ref. ve variantě X nebo Y. Tento vyhodnocovací algoritmus byl nejlepší. Udával nejvyšší kontrast vady a zbytku článku.

Na *Obr. 36* lze vidět srovnání jednotlivých metod při vyhodnocení článku 38.





Obr. 38: Srovnání metod vyhodnocení

Z Obr. 38 lze vyčíst, že výsledky Lock In Ref. – DP – CH 1 – X se neliší od Solar Check – DP – CH 1 – X. Je to dáno tím, že jsou použity stejné výpočetní modely. Rozdíl je, že Solar Check umožňuje získávat další informace o solárních článcích. Tento modul by měl umět počítat defekty na článku a rozdělovat je dle velikosti. Tato funkcionality však během měření nefungovala.

Rozdíl mezi výsledky při použití Solar Check – DP – CH 1 – X a Solar Check – DP – CH 1 – Y je spíše v barevném podání. Jsou vidět totožné artefakty.

Je vidět, že při použití odkazu na sebe samu (Self Ref.) vyhodnocovací algoritmus selhává. Při nastavení reference na Channel 1, což je v tomto případě vstupní signál ve formě sinusu, jsou výsledky značně lepší a lze rozpoznat velké množství artefaktů.

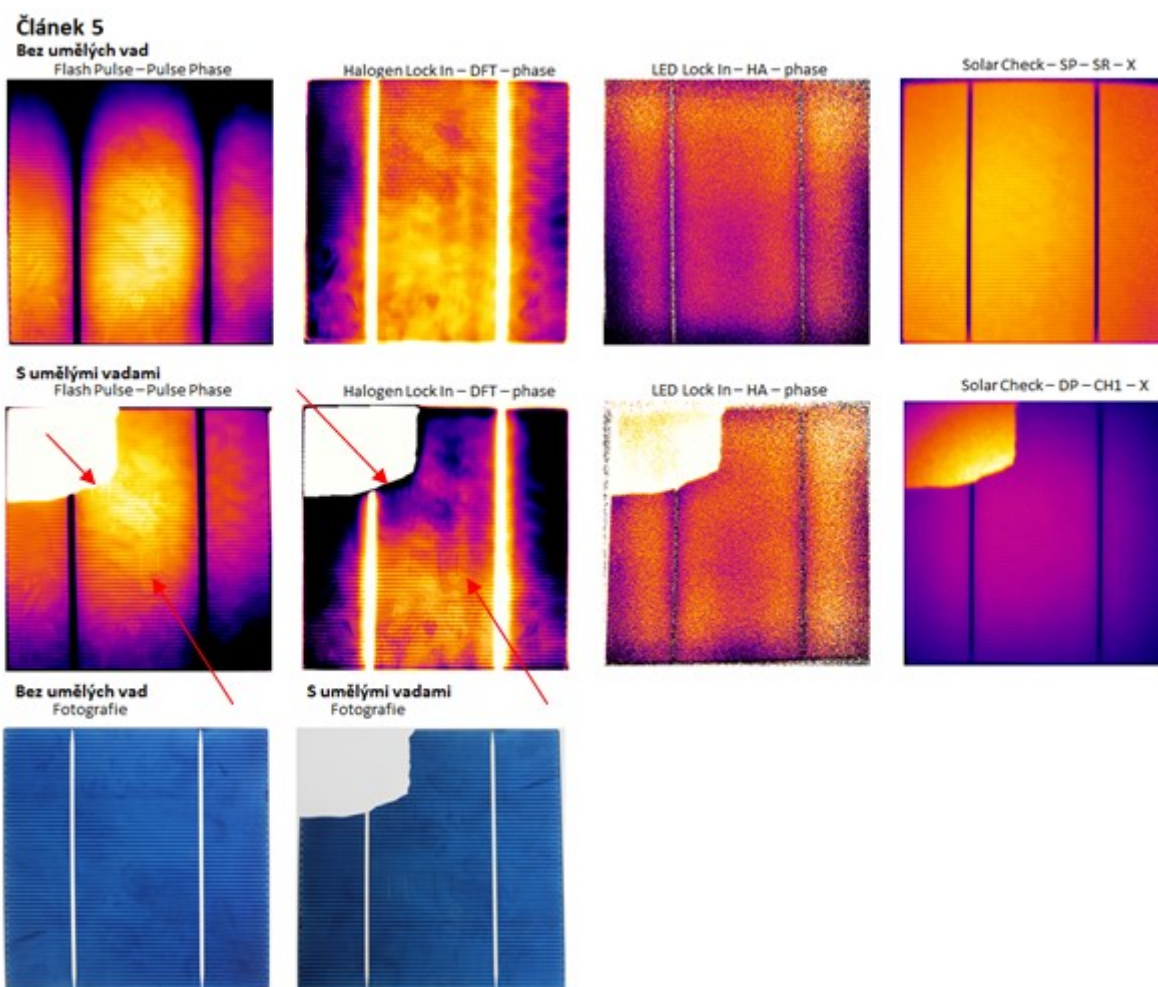
Výše popsané jevy nastávají u všech měřených článků. Je důležité si uvědomit, že kromě nastavení parametrů měření a vybrání vhodného zdroje buzení je neméně důležité využít vhodný vyhodnocovací model.

Ostatní metody umožňují také využití jiného algoritmu vyhodnocení, rozdíly mezi nimi jsou srovnatelné s rozdíly mezi výsledky při použití Solar Check – DP – CH 1 – X a Solar Check – DP – CH 1 – Y. Nestává se, že vady, které by při jednom vyhodnocení byly detekovány, při druhém zjištěny nebyly.

### 3.7.3 Laserem vytvořené vady na články ze sady 1

Pro ověření zachytitelnosti laserem vytvořených vad na článcích ze sady 1 (článek 1-15) byly na dva články vady vytvořeny.

Na článek 5 byly vytvořeny vady laserem stejným způsobem se stejnými parametry jako na článek 35. Solární článek během manipulace praskl. Výsledky jsou na Obr. 39.

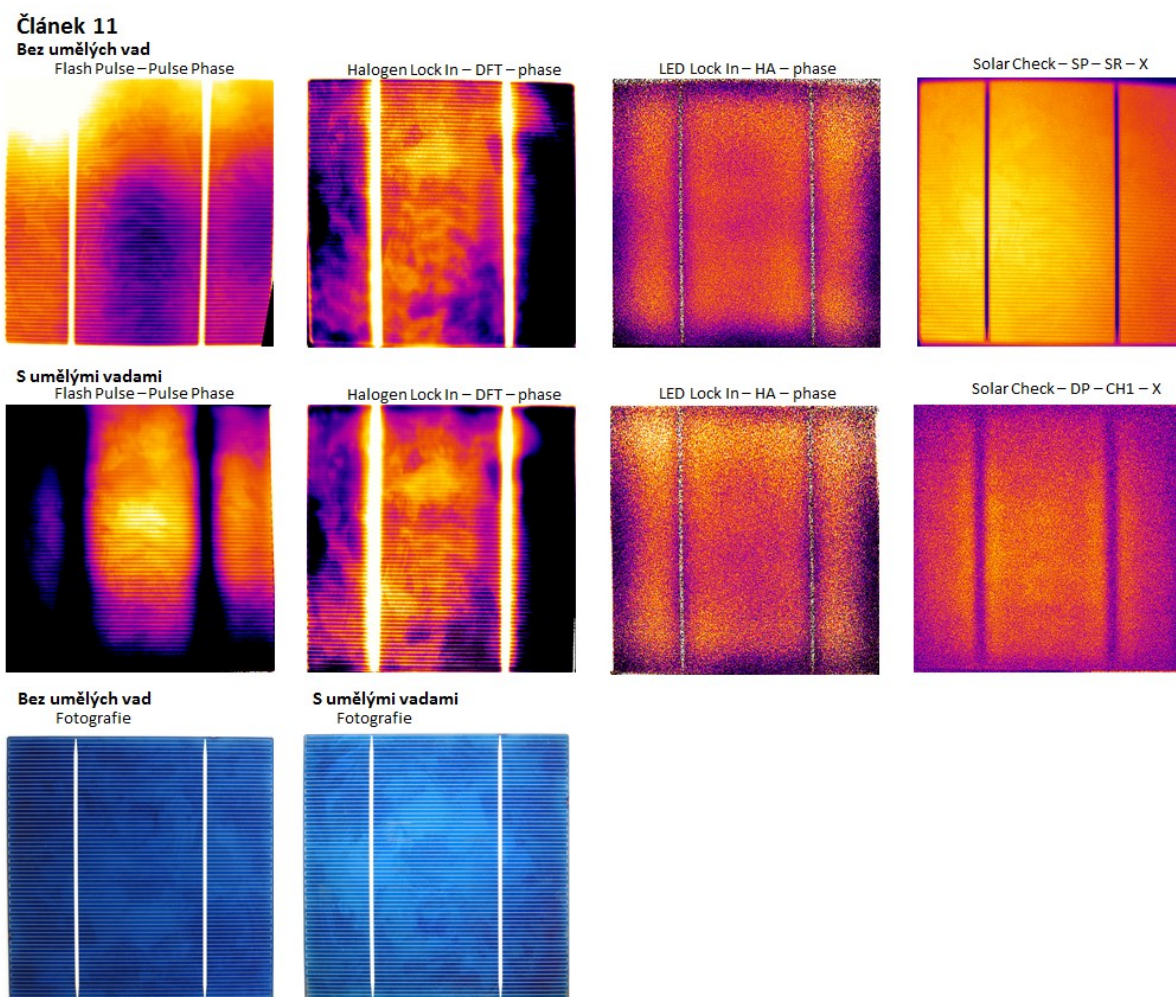


Obr. 39: Vyhodnocení - článek 5 (červené šipky ukazují na vady)

Z výsledků lze zjistit, že metody používající LED buzení nejsou schopny zachytit jakoukoliv nehomogenitu. Je to dáno tím, že se jedná o článek 5 ze sady 1. Všechny články z této sady jsou LED osvětlením nedostatečně vybuzeny. To se krom termografických měření s použitím LED projevilo také při měření VA charakteristik. Měření VA charakteristiky vykazovalo tvar přímky, což značí nedostatečné osvětlení. V tomto stavu nelze dostatečně přesně změřit použitým vybavením VA charakteristiky, protože jsou výrazně ovlivněny okolními vlivy, tj. teplota, stálost světelného zdroje, odpor kontaktů, atp.

Flash Pulse i Halogen Lock In inspekce jsou schopny částečně vady zachytit. Jsou vidět 2 vady ze 4.

Na článku 11 byly vytvořeny vady laserem stejným způsobem se stejnými parametry jako na článek 38. Výsledky jsou na Obr. 40.



Obr. 40: Vyhodnocení - článek 11

Ani jedna z použitých IRNDT metod nebyla schopna zachytit laserem vytvořené vady.

Jestli IRNDT měření bude úspěšné, závisí tedy nejenom na vhodném budicím zdroji, vhodných parametrech měření, vhodných parametrech vyhodnocení, ale také na samotných článcích. Přestože obě sady článků jsou multikrystalické, jsou z pohledu inspekce mezi nimi velmi výrazné rozdíly.

### 3.8 Diskuze výsledků

Z použitých IRNDT metod vychází nejlépe v případě měření článků ze sady 2 ty metody, které využívají jako zdroj buzení LED osvětlení. Tyto metody jsou schopné zachytit nehomogenity na článcích i v původním stavu, tj. bez laserem uměle vytvořených vad. Obě tyto metody LED Lock In a Solar Check se v odborné literatuře souhrnně nazývají  $V_{OC}$ -ILIT. [31] To je metoda, kdy článek není nakontaktován a je osvětlen. Jedná se o běžně využívanou metodu. [32]



Metoda Halogen Lock In také spadá pod  $V_{OC}$ -ILIT; přesto neposkytuje tak dobré výsledky, jako byly získány při buzení LED osvětlením. Hlavními rozdíly mezi halogenovým a LED osvětlením jsou v tom, že halogenová lampa výrazně zahřívá článek a zároveň má spektrum jiných vlnových délek. Při  $V_{OC}$ -ILIT jsou Joulovy ztráty minimální, jelikož obvod není uzavřen. Nicméně zbytkové proudy se v článku uzavírají. [31] Kamerou se zachytí tepelné změny, které tyto proudy způsobí. Závisí především na vlnové délce světla dopadajícího na článek, jak moc se tento jev projeví. Při Halogen Lock In inspekci je tento jev překryt především tepelným ohřátím článku, které je způsobené halogenovou lampou. Může docházet až k nerovnoměrnému ohřevu článku, což výrazně zkresluje výsledky.

Důležitost vhodně vybraného budicího zdroje lze demonstrovat i na člancích ze sady 1, kde použití LED osvětlení bylo nevhodné. Články nebyly dostatečně vybuzeny. To se dalo pozorovat nejenom na vyhodnocení LED Lock In a Solar Check, ale zároveň při měření VA charakteristik (také bylo použito LED osvětlení), kde charakteristiky měly tvar přímky, což je znakem nedostatečně vybuzeného článku.[4]

Velmi překvapivé výsledky poskytla metoda Flash Pulse. Ta se pro testování solárních článků běžně nevyužívá, přesto byla schopna zachytit většinu laserem vytvořených vad. Zároveň na článku 1 (kapitola 4.6.1) poskytla nejlepší výsledky. Tato metoda je minimálně ovlivněna fotovoltaickým jevem článku. Funguje na principu prostupu tepla článkem způsobeným přímo zdrojem buzení, tzn., že vznik zbytkových proudů má na výsledek minimální vliv. Je to dáno především tím, že je článek vybuzen pouze na několik ms, což je doba nedostatečná pro vytvoření dostatečně zachytitelné odezvy způsobené elektrickým proudem. Tato metoda (pulzní termografie) má oproti Lock In termografii tu výhodu, že je velmi rychlá. Měření trvá několik sekund, a proto je také vhodná pro sériové testování. Z principu této metody je jasné, že ne všechny běžné vady jsou touto metodou zachytitelné. Metoda však nabízí potenciál pro rychlé testování a odhalování především mechanických vad článku. Pro běžné nasazení by bylo však třeba podrobit pulzní termografii pro testování solárních článků rozsáhlému výzkumu; s tím, že by bylo třeba jasně specifikovat, jaký typ vad je tato metoda schopna zachytit.

Všechny představené IRNDT metody umožňují zachytit některé typy vad solárních článků. Neposkytují však skutečné elektrické parametry článku. Může se stát, že pomocí IRNDT lze zachytit určité nehomogenity, ale z pohledu elektrického výkonu se nemusí jednat o vady.

Při měření VA charakteristik lze zjistit, zda se na článku nachází vada. Zároveň lze pozorovat parametry, které byly pro testování solárních článků definovány, a lze je také

hodnotit. Např. z parametru  $FF$  se dá zjistit, o jaký typ článku (dle výroby) se jedná. [14] Měření VA charakteristiky jasně udává elektrické vlastnosti článku, což je pro většinu aplikací dostatečné. Jedná se o metodu, která se standardně využívá i pro testování článku v sériové výrobě. [32] Velkou nevýhodou je, že je třeba články nakontaktovat, což je poměrně komplikovaná záležitost z toho důvodu, že články jsou velmi křehké. Může tak dojít ke zničení článků v průběhu testování. Je tedy třeba velmi dobře dimenzovat zařízení pro přivedení kontaktů k solárnímu článku. Oproti představeným IRNDT metodám zároveň nelze vadu prostorově lokalizovat.

Během měření byly zjištěny velké rozdíly v inspekci solárních článků ze sady 1 a 2, přestože jsou stejného typu (multikrystalické solární články). Rozdíl v člancích je způsoben odlišnou technologií výroby. Může se např. lišit čistota křemíku, použitá antireflexní vrstva, tloušťka jednotlivých vrstev, apod. Parametry výroby mohou ovlivnit elektrické vlastnosti článků. Díky tomu se výsledky inspekci (měření VA charakteristik i měření pomocí aktivní termografie) výrazně lišily. Články ze sady 2, díky jejich vlastnostem, bylo možné dostatečně vybudit pomocí použitých zdrojů osvětlení. Provedené inspekce umožnily rozpoznat články s uměle vytvořenou vadou od článků bez uměle vytvořené vady. Pro měření článků ze sady 1 by bylo vhodnější použít jiné zdroje osvětlení. Články nebyly dostatečně vybudeny a díky tomu nebylo možné pomocí provedených inspekci rozpoznat články s vadou a bez vady.

Pro univerzální testování solárních článků by bylo nejvhodnější použít zdroj osvětlení, který splňuje STC (pro měření VA charakteristiky i pro měření pomocí aktivní termografie). Takové zdroje jsou drahé (min. 250 000 Kč) a pro vypracování této práce nebyly dostupné. Při měření článků ze sady 2 se ukázalo, že je možné provést inspekci solárních článků a rozpoznat článek s umělou vadou a bez umělé vady se světelným zdrojem, který je výrazně levnější než zdroj, který splňuje STC.

## Závěr

V této diplomové práci byly ukázány metody testování solárních článků. Byla ověřena vhodnost využití LIT (Lock In Thermography) a předvedeno experimentální měření VA charakteristik. Byla představena metoda pulzní termografie.

Celkem bylo provedeno 340 termografických měření. Pro vypracování této práce byly použity a zhodnoceny pouze výsledky z 203 měření. Zbylá nepoužitá měření byla realizována především pro nalezení vhodných měřicích parametrů a vhodné prostorové konfigurace (tj. umístění zdroje buzení, solárního článku, kamery, ...). Dále bylo realizováno cca. 110 měření VA charakteristik článků. Z toho 45 měření bylo použito pro vypracování této práce. Nepoužitá měření byla realizována pro nalezení vhodné měřicí konfigurace (vhodný zdroj, použité schéma zapojení, kontaktní zařízení, ...).

Z provedených měření bylo zjištěno, že výsledek IRNDT inspekce ovlivňuje nejenom budicí zdroj, metoda buzení, parametry měření, ale i algoritmus vyhodnocení. Potvrdilo se, že LIT je metodou vhodnou pro testování solárních článků. Je však třeba vybrat vhodnou měřicí konfiguraci – především vhodný budicí zdroj. Výhodou použité metody (Voc-ILIT) je, že se jedná o metodu bezkontaktní. Nevýhodou této metody je, že čas inspekce je dlouhý (několik desítek minut). Proto se jedná o metodu nevhodnou pro testování každého článku v sériové výrobě. Jedná se o metodu vhodnou k odhalení příčin vzniku vad především proto, že lze vadu prostorově lokalizovat.

Ukázalo se, že měřením VA charakteristiky lze zachytit uměle vytvořené vady laserem. Tento typ inspekce je při použití správného vybavení vhodný pro testování v sériové výrobě. Je však třeba dbát zvýšené opatrnosti při nakontaktování solárních článků.

Metoda pulzní termografie umožňovala zachytit většinu laserem vytvořených vad a dokonce v jednom případě vykazala lepší výsledky než LIT. Jedná se o metodu, která se standardně pro testování solárních článků nevyužívá. Tato metoda se jeví jako metoda, která by mohla být využívána pro inspekci. Její hlavní předností je bezkontaktnost a zároveň rychlost (měření trvá několik s). K nasazení pro průmyslové využití by však bylo třeba provést ještě rozsáhlý výzkum. Bylo by třeba specifikovat, jaké typy vad lze zachytit na jakých typech článků.

## Seznam literatury

- [1] PERLIN, John. *The invention of solar cells* [online]. [vid. 11. březen 2016]. Získáno z: <http://www.popsci.com/article/science/invention-solar-cell>
- [2] *Bell Labs Creates First Silicon Photovoltaic Cell* [online]. [vid. 11. březen 2016]. Získáno z: <http://www.historycommons.org/context.jsp?item=a1954bellpvcell>
- [3] HANANIA, Jordan a Kailyn STENHOUSE. *Photovoltaic effect* [online]. [vid. 20. říjen 2016]. Získáno z: [http://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic\\_effect](http://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect)
- [4] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. *PV Education* [online]. [vid. 9. květen 2016]. Získáno z: <http://www.pveducation.org/>
- [5] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. *PV types of silicon* [online]. Získáno z: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/types-of-silicon>
- [6] LORENC, M., J. ŠIK a L. VÁLEK. Technologie růstu monokrystalů křemíku Czochralskiho metodou. *Škola růstu krystalů* [online]. 2004, s. 48–57. Získáno z: [http://silicon.euweb.cz/LORENC\\_CZSi.pdf](http://silicon.euweb.cz/LORENC_CZSi.pdf)
- [7] *Solar Cell* [online]. [vid. 20. říjen 2016]. Získáno z: <http://www.madehow.com/Volume-1/Solar-Cell.html>
- [8] *Comon types of solar cells* [online]. [vid. 24. listopad 2016]. Získáno z: <http://www.altenergy.org/renewables/solar/common-types-of-solar-cells.html>
- [9] BERANOVSKÝ, Jiří. *Energie slunce - výroba elektřiny* [online]. [vid. 20. říjen 2016]. Získáno z: <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-slunce---vyroba-elektriny>
- [10] *Energy Informative* [online]. [vid. 20. říjen 2016]. Získáno z: <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>
- [11] BURGER, Bruno, Klaus KIEFER a Christoph KOST. *Photovoltaics Report*. 2016.
- [12] ALRAHIM SHANNAN, Nahla Mohamed Abd, Nor Zaihar YAHAYA a Balbir SINGH. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. *Proceedings - 2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2013* [online]. 2013, č. November, s. 210–214. ISSN 9781479915088. Získáno z: doi:10.1109/ICCSCE.2013.6719960
- [13] TAMRAKAR, Vivek, S C GUPTA a yashwant SAWLE. Single-Diode and Two-Diode Pv Cell Modeling Using Matlab for Studying Characteristics of Solar Cell Under Varying Conditions. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal* [online]. 2015, roč. 4, č. 2, s. 67–77. Získáno z: doi:10.14810/ecij.2015.4207
- [14] KONTGES, Marc, Sarah KURTZ, Corrine PACKARD a Ulrike JAHN. *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. 2014.
- [15] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61730-1 Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction*. B.m.: International Standard. 2016
- [16] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61853-1 Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating*. B.m.: International Standard. 2011
- [17] YONGQING, Wang, Zhao HAIPENG, Song DENGYUAN a Cai AILING. Research to the Typical Defects of Crystalline Silicon Photovoltaic Cells based on EL Images. 2013, roč. 3, č. 3, s. 200–204.
- [18] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61215 Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval*. B.m.:

- International Standard. 2016
- [19] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60891:2009 Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*. B.m.: International Standard. 2009
- [20] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60904:2016 SER Series Photovoltaic devices - ALL PARTS*. B.m.: International Standard. 2016
- [21] KEOGH, W M a A W BLAKERS. Measurement of Silicon Solar Cells under Natural Sunlight. nedatováno.
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 9845-1:1992 Solar energy -- Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions -- Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5*. B.m.: International Standard. 1992
- [23] ZHANG, Chunfu, Jincheng ZHANG, Yue HAO, Zhenhua LIN a Chunxiang ZHU. A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve. *Journal of Applied Physics* [online]. 2011, roč. 110, č. 6, s. 7. ISSN 0021-8979. Získáno z: doi:10.1063/1.3632971
- [24] DUENAS, Salvador, E. PEREZ, H. CASTAN, H. GARCIA a L. BAILON. The role of defects in solar cells: Control and detection defects in solar cells. *Proceedings of the 2013 Spanish Conference on Electron Devices, CDE 2013* [online]. 2013, s. 301–304. Získáno z: doi:10.1109/CDE.2013.6481402
- [25] SOVA, Jan. Základy práce s IČT kamerou Program školení. nedatováno.
- [26] ŠVANTNER, Michal, Petra VACÍKOVÁ a Milan HONNER. Non-contact charge temperature measurement on industrial continuous furnaces and steel charge emissivity analysis. *Infrared Phys. Technol.* 2013, roč. 61, s. 20–26.
- [27] FLIR. *Thermal imaging cameras: a fast and reliable tool for testing solar panels* [online]. [vid. 6. duben 2017]. Získáno z: <http://www.flir.com/instruments/building/display/?id=41872>
- [28] ŠVANTNER, M., VESELY, Z., MUZIKA, L. Depth limits of flash-pulse IRNDT method for low- and high- diffusivity materials. *AITA 2015*. 2015.
- [29] IBARRA-CASTANEDO, Clemente. Chapter 2 . Pulsed Phase Thermography Reviewed. *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase* [online]. 2005. Získáno z: <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23016/ch03.html>
- [30] BREITENSTEIN, Otwin, Wilhelm WARTA a Martin LANGENKAMP. *Lock-in Thermography* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. Springer Series in Advanced Microelectronics. ISBN 978-3-642-02416-0. Získáno z: doi:10.1007/978-3-642-02417-7
- [31] BREITENSTEIN, Otwin a J P RAKOTONIAINA. Lock In Thermography - a universal tool for local analysis of solar cells. *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2005, roč. 7, č. 11, s. 956–963.
- [32] BREITENSTEIN, Otwin. Illuminated versus dark lock-in thermography investigations of solar cells. *Int. J. Nanoparticles* [online]. 2013, roč. 6, č. June 2012, s. 81–92. ISSN 17532507. Získáno z: doi:10.1504/IJNP.2013.054983
- [33] BAUER, Jan, Otwin BREITENSTEIN, Jan-martin WAGNER, Max PLANCK a Microstructure PHYSICS. Lock-in Thermography : A Versatile Tool for Failure Analysis of Solar Cells. *The 40th International Test Conference*. 2009, s. 6–12.
- [34] ROTHBART, Nick, Christiane MAIERHOFER, Matthias GOLDAMMER, Felix HOHLSTEIN, Joachim KOCH, Igor KRYUKOV, Guido MAHLER, Bernhard STOTTER, Günter WALLE, Beate OSWALD-TRANTA a Martin SENGEBUSCH. Probability of detection analysis of round robin test results performed by flash

- thermography. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* [online]. 2016, roč. 6733, č. November, s. 1–23. ISSN 1768-6733. Získáno z: doi:10.1080/17686733.2016.1229246
- [35] MAIERHOFER, Christiane, Philipp MYRACH, Rainer KRANKENHAGEN, Mathias RÖLLIG a Henrik STEINFURTH. Detection and Characterization of Defects in Isotropic and Anisotropic Structures Using Lockin Thermography. *Journal of Imaging* [online]. 2015, roč. 1, č. 1, s. 220–248. ISSN 2313-433X. Získáno z: doi:10.3390/jimaging1010220
- [36] BALAGEAS, D.L., J.-M. ROCHE a F.-H. LEROY. Comparison and ranking procedure for an objective assessment of thermographic NDE methods. *Proceedings of the 2016 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography* [online]. 2016, č. July, s. 79–86. Získáno z: doi:10.21611/qirt.2016.003