

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Možnosti termografie pro diagnostiku FV článků**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Petr BEDNARČÍK  
Osobní číslo: E11B0100P  
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Komerční elektrotechnika  
Název tématu: Možnosti termografie pro diagnostiku FV článků  
Zadávací 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. Rozeberte základní vlastnosti FV článků a technologii jejich výroby.
2. Popište jednotlivé metody diagnostiky FV článků.
3. Analyzujte možnosti použití termografie pro analýzu FV článků.

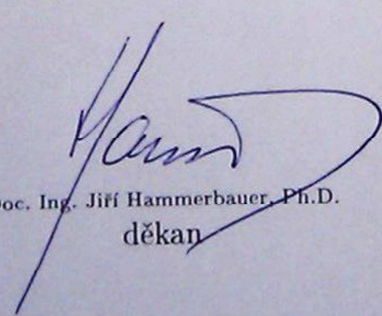


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

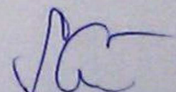
1. přednášky z předmětu KEE/SOES

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Bělík, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení vzniku fotovoltaického jevu, dále pak na rešerši metod výroby fotovoltaických článků, metod diagnostiky fotovoltaických panelů a analýzu termografické metody pro měření fotovoltaických panelů. Úvodní kapitola je zaměřena na popis fotovoltaických článků a jejich parametrů. Další kapitoly práce jsou zaměřeny na používané materiály a postupy výroby fotovoltaických článků a fotovoltaických panelů. Následná část práce popisuje postupy metod diagnostiky fotovoltaických panelů. V poslední části práce je analyzován postup termografického měření a stav předváděcích fotovoltaických panelů na budově Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

## **Klíčová slova**

Fotovoltaický panel, fotovoltaický článek, fotoelektrický jev, fotovoltaický jev, termokamera, termografie, termovizní měření.

## **Abstract**

The bachelor theses presents the solution of the photovoltaic effect, recherche methods for the production of photovoltaic cells, methods of diagnosis photovoltaic panels, and analysis of thermographic methods for the measurement of photovoltaic panels. The introductory chapter is focused on the description of photovoltaic cells and their parameters. Next parts of the analysis on the use of materials and methods of manufacture photovoltaic cells and photovoltaic panels. Subsequent chapters describe the methods of diagnosis procedures photovoltaic panels. In the last part of the thesis analyzes the process of thermography measurement and status demonstration of photovoltaic panels on the building of the Faculty of Electrical Engineering University of West Bohemia in Pilsen.

## **Keywords**

Photovoltaic panel, solar cell, photoelectric effect, photovoltaic effect, thermal imager, thermography, thermal measurement.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, které je součástí této bakalářské práce.

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

V Plzni dne 4.6.2014

.....  
Petr Bednarčík

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji Ing. Pavlu Šteklovi, Ph.D. za zapůjčení termokamery a pomoc v oblasti problematiky termokamer.

# Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI FV ČLÁNKŮ .....</b>	<b>12</b>
1.1 PRVNÍ FV ČLÁNKY A FOTOELEKTRICKÝ JEV .....	12
1.1.1 Fotoelektrický jev vnější.....	13
1.1.2 Fotoelektrický jev vnitřní .....	14
1.1.3 PN přechod .....	15
1.2 STRUKTURA FV ČLÁNKU .....	16
1.3 PARAMETRY FV PANELŮ .....	17
1.3.1 Mechanické parametry.....	17
1.3.2 Elektrické parametry.....	17
1.3.3 Ztráty FV panelu.....	21
<b>2 TYPY FV ČLÁNKŮ A TECHNOLOGIE JEJICH VÝROBY.....</b>	<b>22</b>
2.1 KŘEMÍKOVÉ ČLÁNKY .....	22
2.1.1 Články z monokrystalického křemíku.....	22
2.1.2 Články z polykrystalického křemíku.....	23
2.1.3 Články z amorfního křemíku .....	24
2.1.4 Další materiály pro FV články.....	25
2.2 TECHNOLOGIE VÝROBY FV PANELU .....	26
<b>3 METODY DIAGNOSTIKY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....</b>	<b>28</b>
3.1 LABORATORNÍ DIAGNOSTIKA .....	28
3.1.1 ELCD test.....	28
3.1.2 FLASH test.....	29
3.1.3 Měření VA charakteristik .....	29
3.1.4 Fotoluminiscenční test .....	29
3.1.5 Metoda LBIC a LBIV .....	30
3.1.6 Metoda luminiscenční mikroplazmy.....	31
3.1.7 Izolační zkouška.....	31
3.1.8 Klimatické zkoušky.....	32
3.2 DIAGNOSTIKA V TERÉNU .....	32
3.2.1 Vizualní kontrola.....	32
3.2.2 Solární analyzátory.....	32
3.2.3 Termografie .....	33
<b>4 POUŽITÍ TERMOGRAFIE PRO ANALÝZU FV ČLÁNKŮ.....</b>	<b>34</b>
4.1 MĚŘENÍ FV PANELŮ .....	36
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>38</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>39</b>



## Seznam použitých symbolů a zkratek

$E$	[J]	Energie fotonu
$A$	[J]	Výstupní práce
$\Delta E$	[J]	Ztráty při emisi elektronu z krystalové mřížky
$E_{\text{KIN}}$	[J]	Kinetická energie emitované elektronu
$h$	[J*s]	Planckova konstanta ( $6,626\ 176 * 10^{-34}$ J*s)
$c$	[m/s]	Rychlost světla ve vakuu ( $3 * 10^8$ m/s)
$I_{\text{K}}$	[A]	Proud nakrátko
$U_{\text{L}}$	[V]	Napětí naprázdno
$I_{\text{MPP}}$	[A]	Proud maximálního výkonu
$U_{\text{MPP}}$	[V]	Napětí maximálního výkonu
$P_{\text{MAX}}$	[W]	Maximální výkon
FF	[-]	Faktor plnění
$\Delta P_{\text{MAX}}$	[%]	Tolerance maximálního výkonu
$R_{\text{M}}$	[ $\Omega$ ]	Vnitřní odpor
$\nu$	[Hz]	Frekvence dopadajícího fotonu
$\eta$	[%]	Účinnost

---

$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$\lambda_0$	[m]	Mezní vlnová délka
FV		Fotovoltaický
VA		Volt ampérová
AM		Air mass
SiO <sub>2</sub>		Oxid křemičitý
EFG		Edge - Defined film - Fed growth
GaAs		Arsenid galitý
CIS		Diselenid mědi a india
CdTe		Telurid kadmia
EVA		Etylen – vinyl acetát

## Úvod

V posledních letech pozorujeme v České republice velký rozvoj v oblasti budování fotovoltaických elektráren. A to i přesto, že jejich využití je u nás méně efektivní než na území států, které se nacházejí blíže rovníku. Všechny fotovoltaické elektrárny však také potřebují kontrolu, aby využití přeměny sluneční energie na energii elektrickou bylo maximální. Pokud se vyskytne porucha nebo vada, je potřeba ji správně analyzovat a vyhodnotit.

Hlavním cílem této práce je využití termografické metody měření fotovoltaického panelu. K dosažení tohoto cíle je třeba popsat základní vlastnosti fotovoltaických článků, tedy vysvětlit termín fotovoltaický jev a popsat strukturu a parametry fotovoltaických panelů. Této problematice se věnuje první kapitola. V následující části práce jsou popsány typy fotovoltaických článků a technologie jejich výroby. Stěžejní kapitoly se věnují metodám diagnostiky fotovoltaických článků, konkrétně laboratorní diagnostice a diagnostice v terénu. V závěru práce je popsáno použití termografie pro analýzu fotovoltaických článků. Je popsán postup termografického měření a na jeho základě vyhodnocen stav fotovoltaických panelů na budově Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Problematika fotovoltaických panelů mi byla vždy blízká. Hledání vhodného námětu na bakalářskou práci proto nebylo obtížné. Fotovoltaika má, myslím, velký význam v oblasti obnovitelných zdrojů energie a proto podporuji další výzkumy v této oblasti.

# 1 Základní vlastnosti FV článků

## 1.1 První FV články a fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev je takový jev, při kterém se přemění světelné záření na elektrickou energii. Tato skutečnost byla známa již od 19. století, hojně se však začal využívat až v polovině 20. století.

První zmínku o fotoelektrickém jevu popisuje v roce 1839, tehdy devatenáctiletý francouzský mladík, Alexander Edmond Becquerel (1820 - 1891) a jeho otec, francouzský fyzik Antoino César Becquerel (1788 – 1878). Jev pozorovali při experimentu s vodivými elektrodami vloženými do nádoby s elektrolytem. Zjistili, že při změně osvětlení slunečními paprsky se mění proud procházející elektrodami. Tento jev začali nazývat „Becquerelův efekt“. Alexander Edmond Becquerel se později stal fyzikem, jako byl jeho otec.

Dalším důležitým historickým milníkem pro fotovoltaiku byl rok 1879. Tohoto roku na King's College v Londýně profesor William Gryll Adams (1836 – 1915) a jeho student Richard Evans Day vytvořili první fotovoltaický článek. Ten produkoval elektrický proud v závislosti na změně osvětlení bez dalšího použití tepla a pohyblivých částí. Článek byl vytvořen na bázi polovodivého selenu a platiny. [1]

Další krok učinil Američan Charles Edgar Fritts (1850 – 1903). Ten vyvinul první fotovoltaický článek určený pro komerční použití. Článek byl vyroben z tenkého filmu polovodivého selenu, na kterém byla napařena mřížka z čistého zlata. Tato kombinace byla vložena mezi skleněné desky. Tyto články dosahovaly účinnosti pod 1 %, a proto se pro komerční a praktické použití nechytily. [2]

Revoluční metodou k výrobě fotovoltaických panelů, které se velmi podobají dnešním, moderním, byla příprava monokrystalického křemíku. Tu vyvinul polský chemik Jan Czochralski.

Dne 17. března 1905 popsal fyzik Albert Einstein (1879 – 1955) fotoelektrický jev na základě kvantové fyziky pevných látek a za tento objev dostal v roce 1922 Nobelovu cenu. Jeho výklad fotoelektrického jevu popisoval vnější fotoelektrický jev. Dnes rozlišujeme fotoelektrický jev vnitřní a vnější.

Obrovský pokrok v rozvoji fotovoltaických článků nastal až při rozvoji kosmonautiky v 50. letech 20. století. První FV článek pro výrobu elektřiny v kosmu byl vyvinut roku 1954 v Bellových laboratořích v USA a dosahoval účinnosti 6 %. Od té doby jde vývoj stále dopředu. [2, 3, 4, 5]

### 1.1.1 Fotoelektrický jev vnější

K fotoelektrickému jevu vnějšímu dochází nejčastěji při dopadu fotonů na povrch materiálu s kovovou vazební mřížkou. Bývá nazýván jako fotoemise. Dochází k zániku fotonu a předání jeho energie elektronu. Předaná energie je upotřebena na uvolnění elektronu z vodivostního pásu a následné opuštění krystalu. Děj popisuje zákon zachování energie, ze kterého plyne:

$$E = A + \Delta E + E_{kin} \quad (1.1)$$

$E$  – energie fotonu

$A$  – výstupní práce

$\Delta E$  - ztráty při emisi elektronu z krystalové mřížky

$E_{KIN}$  – kinetická energie emitované elektronu

Bylo zjištěno, že tento jev je závislý na intenzitě a frekvenci dopadajícího fotonu  $\nu$ , respektive vlnové délce  $\lambda_0$ . Pokud je intenzita osvětlení vysoká, koncentrace emitovaných elektronů je také vysoká. Vlnová délka určuje velikost kinetické energie  $E_{KIN}$ . Mezní vlnová délka  $\lambda_0$  dopadajícího záření odpovídá velikosti energie potřebné k uvolnění elektronu z mřížky s právě nulovou kinetickou energií. Ztráty při emisi elektronu zanedbáme a dostaneme vztah:

$$A = E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} [J] \quad (1.2)$$

$h$  – Planckova konstanta ( $6,626\ 176 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$ )

$\nu$  – frekvence dopadajícího fotonu [Hz]

$c$  – rychlost světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

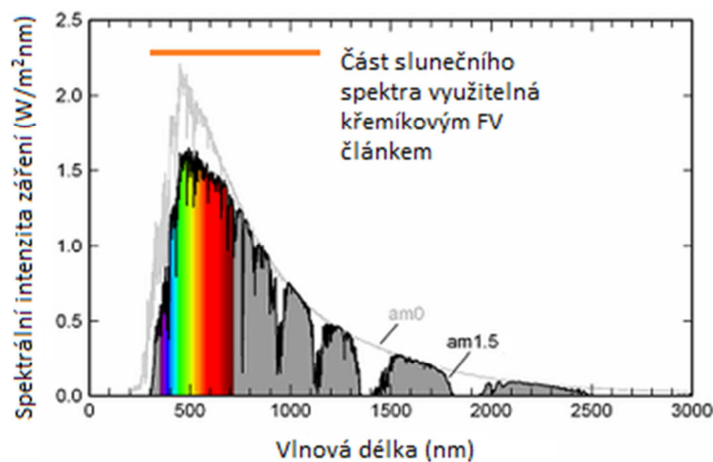
$\lambda$  – vlnová délka [m]

Záření s vlnovou délkou menší než  $\lambda_0$ , nemá dostatek energie na uvolnění elektronu z mřížky kovu, nedojde proto k fotoemisi. Naopak záření s vyšší vlnovou délkou má kinetickou energii nenulovou, dojde k fotoemisi. [6]

Fotoemise neboli fotoelektrický jev vnější, je nevhodný k technické výrobě elektrického proudu z důvodu malé účinnosti. Z pohledu fyziky je tento poznatek důležitý, proto byla zavedena nová jednotka, elektronvolt – eV, představující velmi malé množství energie. Jednotka 1 eV byla stanovena ve vakuu a odpovídá energii elektronu urychleným napětím 1 V. Elektronvolt je vedlejší jednotka soustavy SI a pro převod se používá vztah:  $1 \text{ eV} = 1,60217657 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . [6, 7]

### 1.1.2 Fotoelektrický jev vnitřní

Fotoelektrický jev vnitřní, známý také jako fotovoltaický jev, je založen na schopnosti materiálu absorbovat energii dodanou z fotonu a zároveň dodat energii na uvolnění elektronu z krystalické struktury polovodičového materiálu. Tím materiál zvyšuje svoji vodivost.



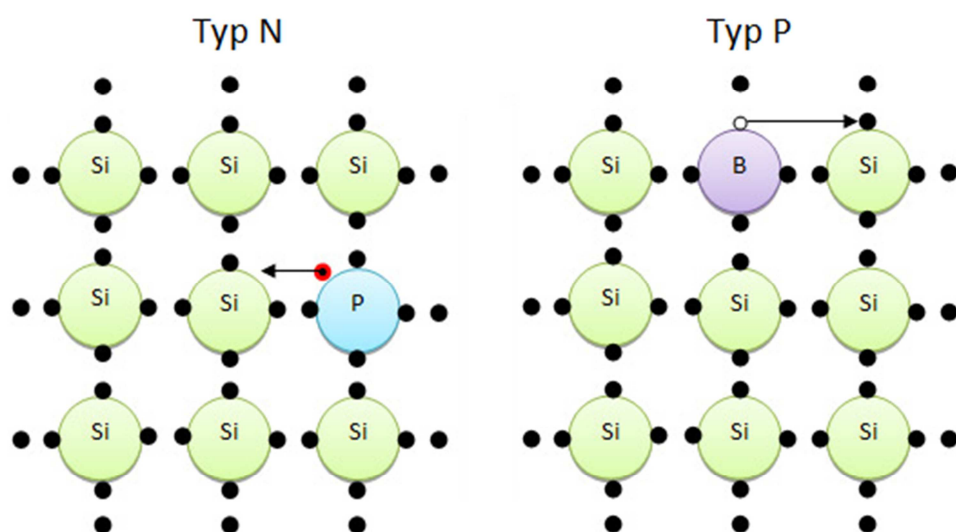
Obr. 1.1 Část spektra slunečního záření využitelná křemíkovým FV článkem [6]

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu FV článků je křemík, který má šířku zakázaného pásu 1,12 eV, což po dosazení do známého vztahu pro výpočet velikosti energie  $A$  představuje vlnovou délku 1107 nm, oblast infračerveného záření. Fotony procházející atmosférou mají energii od 0,5 eV (2480 nm) do 2,9 eV (428 nm). Z toho plyne, že křemík využije většinu energie z dopadajícího slunečního záření na zemský povrch. [6, 7]

Fotony s energií větší než 1,12 eV a zároveň kratší vlnovou délkou než 1107 nm, uvolní elektron. Zbylá energie fotonu se přemění na tepelnou energii. Návrat uvolněného elektronu zpět do mřížky je také doprovázen tepelnou energií. Vzniklé teplo způsobuje ztráty zamezující dosažení účinnosti křemíkového článku nad 55 %. Pro vytvoření elektrické energie ze slunečního záření je nutné od sebe oddělit elektrony (záporný náboj) od vzniklých děr (kladný náboj). Takové oddělení se nazývá PN přechod. [6, 7]

### 1.1.3 PN přechod

Princip PN přechodu lze jednoduše vysvětlit na nejvyužívanějším polovodiči, křemíku. Čistý křemík je tvořen mřížkou atomů. Atomy jsou navzájem spojeny kovalentními vazbami. Ty ovšem nejsou tak pevné, a proto i malé množství energie stačí k tomu, aby nízká koncentrace elektronů překonala zakázaný pás a dostala se do vodivostního pásu. Zvyšováním tepelné energie se křemík stává více vodivým, z důvodu větší koncentrace volných elektronů ve vodivostním pásu. Velice podobná situace nastává i při dodání energie slunečním zářením. [5, 6, 9]



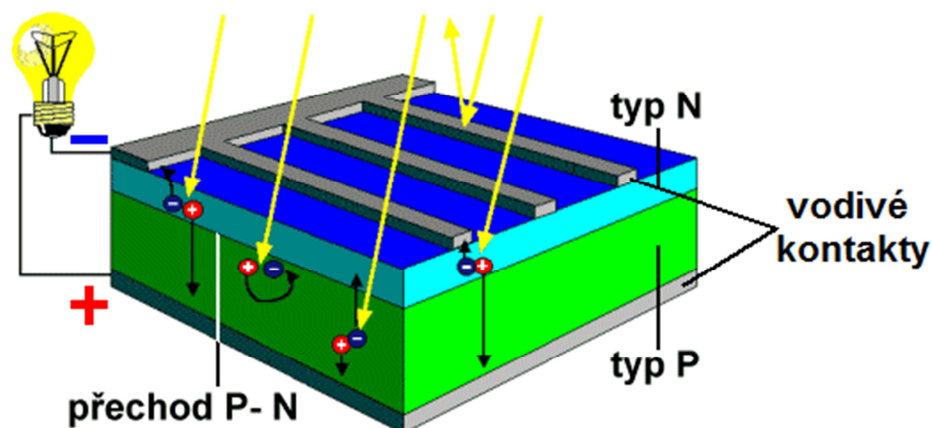
Obr. 1.2 Struktura polovodiče typu N a typu P [5]

Pro zvýšení vodivosti samotného křemíku zavádíme takzvané dopování, přidání malého množství příměsí – boru a fosforu. Křemík má 4 elektrony ve valenční vrstvě. Příměsí fosforu, který má ve valenční sféře 5 elektronů, se vytvoří polovodič s majoritními nosiči záporných nábojů, elektronů, tzv. polovodič typu N (negative). Naopak křemík s příměsí boru, který má ve valenční vrstvě elektrony pouze 3, je polovodič s kladnými majoritními nosiči náboje, tzv. dírami, tento polovodič je typu P (positive). Spojením těchto polovodičů vznikne v místě spoje vrstva nazývaná se PN přechod o šířce zhruba 1  $\mu\text{m}$ . [3, 5, 8, 9]

Dopadají-li fotony na povrch FV článku, hromadí se elektrony ve vrstvě typu N, minoritní nosiče náboje přecházejí volně z vrstvy typu P do vrstvy typu N, kde se stávají majoritními nosiči náboje. Nahromaděné elektrony tak vytvářejí elektrické napětí o hodnotě přibližně 0,6 V. [5, 6, 7]

## 1.2 Struktura FV článku

FV článek je plošná polovodičová dioda, na jejíž PN přechod je umožněno dopadání slunečního záření. Samotný FV článek je tvořen tenkým plátem křemíku, polovodičem typu P. Na ten se při výrobě nanese tenká vrstva polovodičového materiálu typu N. Tímto je vytvořen PN přechod, který je z obou stran opatřen vodivými kontakty z kovu.



Obr. 1.3 Řez fotovoltaickým článkem [13]

Při dopadu záření na článek se vytvoří kladné díry a záporné elektrony. Ty se díky PN přechodu oddělí a putují na opačné strany, elektrony do vrstvy typu N a díry do vrstvy typu P. Vrstva typu N se stane záporným pólem a vrstva typu P vytvoří kladný pól. Napětí u takového článku se pohybuje v rozmezí 0,5 – 0,6 V. Toto napětí je prakticky nevyužitelné,



a proto se články spojují do série. Používá se zapojení s 36 nebo 72 články. Ty jsou schopny vyvinout napětí 18 V nebo 36 V. [5, 8, 13]

### 1.3 Parametry FV panelů

Parametry jsou souhrny různorodých informací, které nám pomohou vybrat vhodný fotovoltaický panel pro výrobu elektrického proudu.

#### 1.3.1 Mechanické parametry

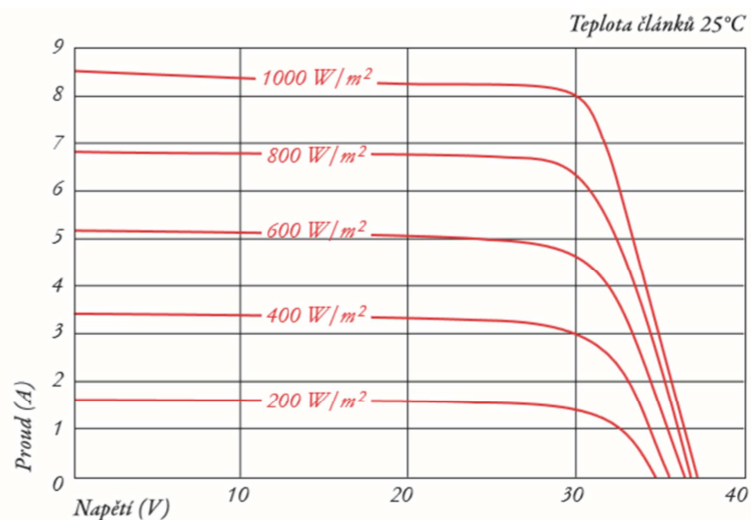
Mechanické parametry uvádí výrobce ve svém katalogovém listu. Tyto parametry představují především vnější rozměry panelu, hmotnost, celkovou plochu, použitý výrobní materiál a především životnost panelu a pokles výkonu za určité časové období.

#### 1.3.2 Elektrické parametry

Elektrické parametry udává každý výrobce v katalogovém listu. Jedná se o VA charakteristiku, proud nakrátko, napětí naprázdno, proud a napětí maximálního výkonu, maximální výkon, tolerance výkonu, faktor plnění, účinnost a vnitřní odpor.

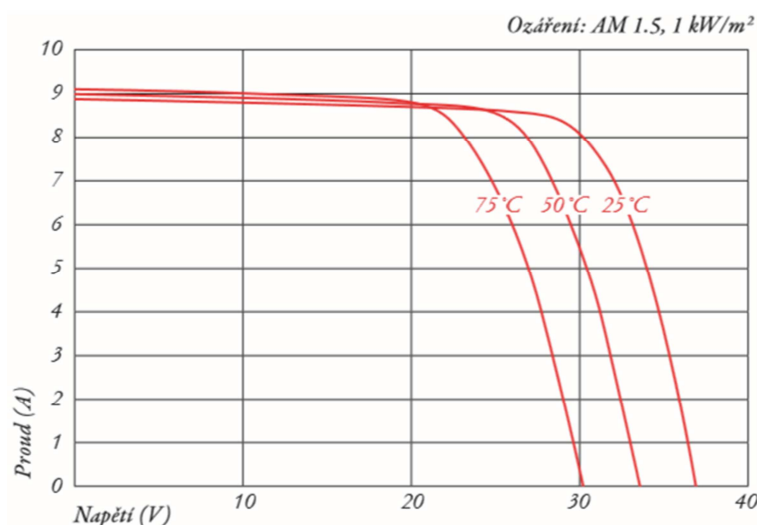
#### VA charakteristika

Volt ampérová charakteristika udává závislost proudu na napětí. Jedná se o hlavní údaj FV panelu, výrobce uvádí její průběh v katalogovém listu.



Obr. 1.4 VA charakteristika FV panelu v závislosti na slunečním záření [10]

Pro každou hodnotu osvětlení se mění i průběh charakteristiky. VA charakteristika je také závislá na teplotě panelu, se zvyšující se teplotou se snižuje výkon. [5, 7]



Obr. 1.5 VA charakteristika FV článku v závislosti na teplotě [10]

### Proud nakrátko $I_k$

Tato hodnota vyjadřuje nejvyšší hodnotu proudu, kterou může panel vykonat. Veličina je závislá na teplotě, intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti panelu a na rozměrech panelu. Proud nakrátko je jinak označován i jako fotoelektrický proud. Hodnota proudu nakrátko se pohybuje v rozmezí desítek mA až jednotek A. Někdy bývá označován jako zkratový proud.

### Napětí naprázdno $U_L$

Jde o maximální hodnotu napětí nezatíženého panelu. Tuto hodnotu měříme za předem stanovených hodnot osvětlení a okolní teploty. Hodnota se pohybuje v řádu desítek V.

### Proud maximálního výkonu $I_{MPP}$

Jedná se o hodnotu proudu při maximálním vykonávaném výkonu.

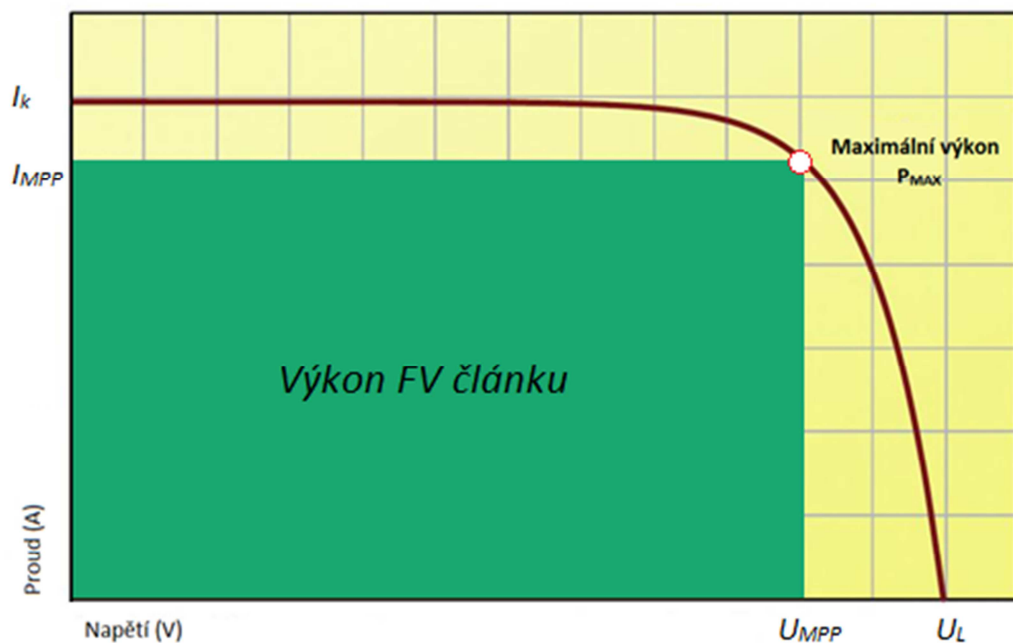
### Napětí maximálního výkonu $U_{MPP}$

Jde o hodnotu napětí při maximálním vykonávaném výkonu.

### Maximální výkon $P_{MAX}$

Maximální výkon je charakteristická hodnota FV panelu. Tuto hodnotu udává součin proudu a napětí maximálního výkonu, nebo také součin proudu nakrátko  $I_K$ , napětí naprázdno  $U_L$  a faktoru plnění  $FF$ . Veličina je závislá na spektru, intenzitě dopadajícího záření a materiálu, ze kterého je článek vyroben. Maximální výkon je nejběžněji používaným parametrem pro porovnání výkonnosti jednotlivých FV článků. Z toho důvodu měření probíhá za standardizovaných podmínek, tj. při ozáření  $1000 \text{ W/m}^2$ , teplotě článku  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a hodnotě  $AM = 1,5$  tzn., že složení spektra záření odpovídá spektru záření procházejícího zemskou atmosférou. Hodnota maximálního výkonu je spíše teoretická, v provozu běžně nedosažitelná.

$$P_{MAX} = U_L \cdot I_K \cdot FF \text{ [W]} \quad (1.3)$$



Obr. 1.6 Znárodnění výkonu FV článku ve VA charakteristice [14]

### Tolerance výkonu $\Delta P_{MAX}$

Hodnota udává procentuální toleranci udávaného maximálního výkonu. Číselně se pohybuje hodnota do  $\pm 5 \%$ .

### Faktor plnění $FF$

Faktor plnění, neboli Fill Factor, je určen poměrem výkonů. Výkonu maximálního  $P_{MAX}$  a výkonu, který určí proud nakrátko  $I_K$  a napětí naprázdno  $U_L$ . Ideální stav nastane, pokud se faktor plnění rovná číselné hodnotě 1. Obvykle se hodnota pohybuje kolem 0,7 až 0,9.

$$FF = \frac{P_{MAX}}{U_L \cdot I_K} [-] \quad (1.4)$$

### Účinnost FV panelu

Účinnost FV panelu je vyjádřena podílem maximálního výkonu a energií dopadajícího záření  $P_Z$ . Hodnota účinnosti je závislá na použitém materiálu článku. Monokrystalické články mají účinnost 15-18 % a polykrystalické 13-16 %.

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_Z} = \frac{P_{MAX}}{S_P \cdot E} [\%] \quad (1.5)$$

### Vnitřní odpor $R_M$

Vnitřní odpor článku vypočítáme z hodnot proudu a napětí dodávaného při maximálním výkonu.

$$R_m = \frac{U_{mp}}{I_{mpp}} [\Omega] \quad (1.6)$$

Další důležité parametry, které jsou uvedeny v katalogovém listu, jsou teplotní koeficienty. Ty udávají procentuální změnu výkonu, napětí nebo proudu v závislosti na změně teplotního stupně. Tyto koeficienty jsou důležité především v lokalitách s velkými rozdíly teplot. Při změně teploty o 30 °C dochází ke změně výkonu až o 10 %. [7]

### 1.3.3 Ztráty FV panelu

Omezení elektrických i optických ztrát je hlavním argumentem při konstrukci fotovoltaických panelů. Zvýšení výkonu panelů je vítané pro poměrně vysoké ceny modulů.

Neúplná absorpce a odraz záření, to jsou hlavní optické ztráty. Činitel odrazu pro křemík se pohybuje kolem hodnoty 30 %. Z tohoto důvodu se používají antireflexní skla. Ta sníží hodnotu činitele až pod 10 %. Antireflexní vrstvy jsou vyrobeny z organických nebo anorganických materiálů. Poslední dobou se upřednostňuje výroba antireflexních skel z anorganického materiálu z důvodu recyklace. Jinou možností, jak snížit činitel odrazu, je vyleptání povrchu. Vyleptání vytvoří na povrchu jehlanovitou strukturu, ta umožní vstup fotonů směrem do článku. Pro odvod elektrického proudu z vrchní strany panelu se používají průhledné kontakty. Ty jsou navrženy tak, aby ztráty způsobené stíněním a elektrickým odporem byly co nejmenší. Většinou se pro průhledné kontakty používá oxid cínu. Naopak ze spodní strany panelu se používá neprůhledný kontakt. [5, 13]

Další efektivní možností nárůstu účinnosti panelů je použití speciálních oboustranných panelů. Pokud je takovýto panel nainstalován na bílé nebo stříbrné střeše, může odražené světlo dopadat ze zadní strany panelu. Praxe uvádí zvýšení účinnosti až o 30 %. Jinou možností, jakou lze zvýšit denní produkci elektřiny, je využití natáčecího modulu. Modul sleduje pohyb Slunce a zajišťuje trvalý kolmý dopad světla na panel. Jiná alternativa zvýšení účinnosti je pořízení koncentrátoru. Ten zajišťuje sběr slunečních paprsků z velkého prostoru a jejich soustředění na malý prostor, na panel. Ovšem tato alternativa má i svou nevýhodu. Koncentrované záření může zahřát panel, a tím snížit jeho účinnost. V horším případě panel trvale poškodí. [5, 13]

## 2 Typy FV článků a technologie jejich výroby

### 2.1 Křemíkové články

Křemík patří mezi nejpoužívanější polovodiče v elektrotechnice. Vyznačuje se stříbřitě šedou barvou, stálostí a zdravotní nezávadností. V zemské kůře je obsažen více jak 25 % a vyskytuje se převážně ve sloučeninách. V praxi se setkáváme se třemi základními typy křemíkových článků. Jsou to články z monokrystalického křemíku, polykrystalického křemíku a amorfního křemíku. Křemíkové články mají více než 90 % zastoupení na trhu.

Čistý křemík, až s 99,999999% čistotou, se získává z drtě oxidu křemičitého. V obloukové peci se za teplot přibližně 2000 °C, postupem zvaným redukce odstraní ze sloučeniny SiO<sub>2</sub> atomy kyslíku. Tímto procesem získáme křemík o čistotě 98 – 99 %. Pro výrobu křemíku, používaného ve fotovoltaice, jsou využívány chemické metody. Jedna z používaných metod je patentem společnosti Siemens. Za pomoci kyseliny chlorovodíkové se rozpustí křemík, přemění se na sloučeninu trichlorsilan, ze které se za teplot kolem 1000 °C a zvýšeného tlaku odděluje křemík. Takto vzniká polykrystalický křemík dosahující čistoty až 99,99 % a je připraven na výrobu fotovoltaických článků. [12]

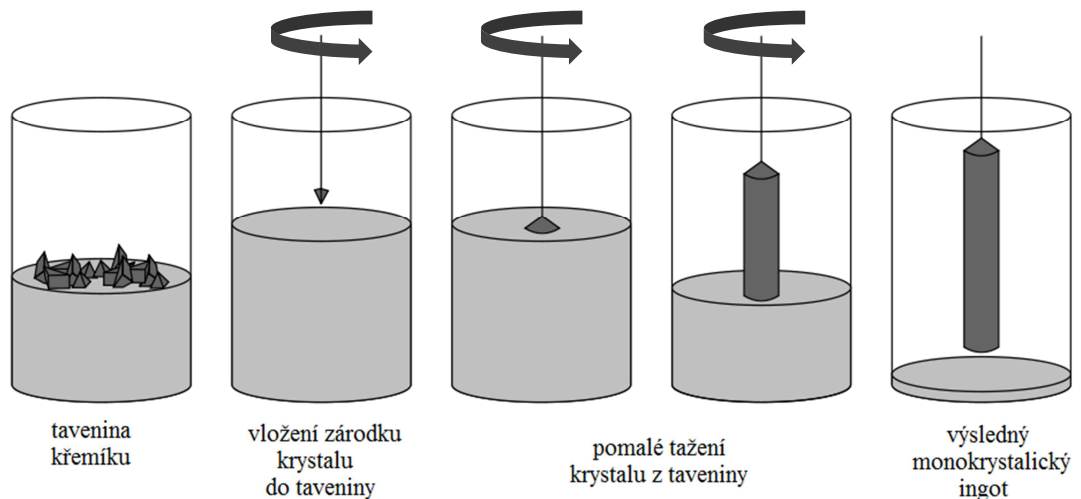
#### 2.1.1 Články z monokrystalického křemíku

Tento typ článků je prakticky nejstarším. Fotovoltaické články z monokrystalického křemíku dosahují účinnosti až 17 %, v laboratorních podmínkách až 25 % a vyznačují se výbornou stabilitou výkonu. Monokrystalický článek se vyznačuje zaoblenými rohy.

#### Technologie výroby

Výroba monokrystalického křemíkového článku spočívá v Czochralského metodě pomalého tažení krystalu. Polykrystalický křemík je roztaven za teploty 1420 °C v křemenném kelímku, do taveniny se vnoří zárodek krystalu křemíku, a ten je pomalu tažen z roztavené směsi za otočného pohybu. Vzniklý křemíkový ingot o průměru až 30 cm a délkou až několika metrů je rozřezán speciální drátovou pilou na tenké pláty tzv. wafery, zhruba 200 – 400 μm tenké. Nařezané pláty jsou následně leštěny nebo leptány, aby se zbavily nečistot a nerovností po řezu. Napařením fosforu se na povrchu vytvoří PN přechod. Poté jsou články opatřeny antireflexním nátěrem, který zabraňuje ztrátám odrazem a dává

fotovoltaickým článkům charakteristickou modrou barvu. Nakonec jsou články opatřeny technologií sítotisku vodivými kontakty. Na přední straně se mohou použít i průhledné kontakty, popsané již v předchozí kapitole, nebo mohou být zapuštěny do článku, popřípadě mohou být vyvedeny na spodní straně článku. Díky tomuto zpracování má monokrystalický fotovoltaický článek jednotnou molekulární strukturu, a proto i vyšší účinnost. Hlavní nevýhodou Czochralského metody je poměrně vysoká energetická náročnost a velký výskyt odpadu po řezání. [5, 13]



Obr. 2.1 Czochralského metoda [5]

Podobnou metodou je tažení monokrystalického pásku z taveniny. Tažený pásek má obdélníkový tvar a je tenký. Díky tomu tato metoda předchází nevýhody Czochralského metody. [5, 13]

### 2.1.2 Články z polykrystalického křemíku

Články se skládají z malých zrn monokrystalů křemíku. Účinnost se za normálních podmínek pohybuje kolem 16 %, v laboratorních podmínkách lze dosáhnout až 20 %. Menší účinnost je způsobena hranicí krystalů křemíku, která brání toku elektronů, a tím vzniká vyšší odpor. Na první pohled lze rozeznat polykrystalický článek od monokrystalického strukturou podobnou leštěnému kameni s ostrými rohy.

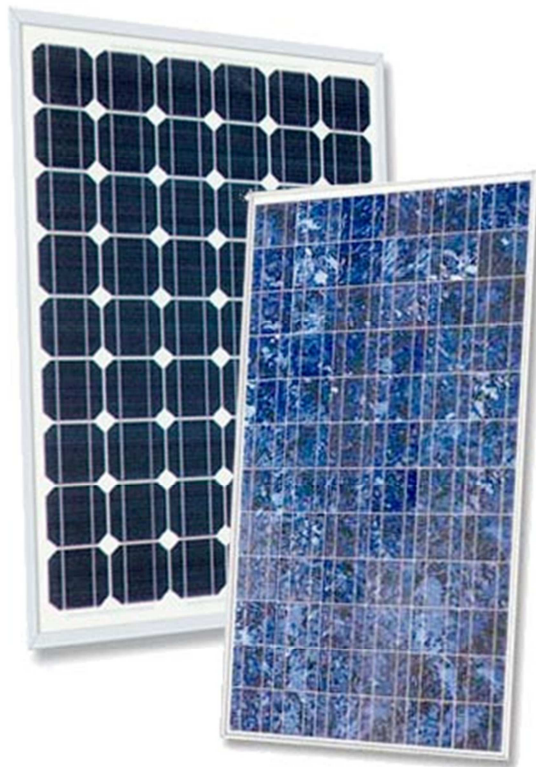
#### Technologie výroby

Výroba spočívá v odlévání taveniny čistého křemíku za teploty 1500 °C do blokových forem. Tato metoda je podstatně jednodušší a levnější. Odlitky se následně ochlazují k bodu

tání křemíku. Ty se pak řežou na tyče a dále pak na plátky. Polykrystalický křemík je materiál silnější oproti monokrystalickému křemíku a lze vytvořit i články o tloušťce až 77  $\mu\text{m}$ .

Vytvořit polykrystalický článek lze i metodou EFG (edge - defined film - fed growth). Jedná se o metodu tažení osmihranné, nebo až dvanáctihranné křemíkové duté tyče. Vytažené tyče se rozřežou na hotové obdélníkovité či čtvercovité plátky.

Další využívanou metodou je tzv. metoda string ribbon. Tato metoda spočívá v tažení křemíkového pásu mezi grafitovými lisami. Vhodné nastavení teplotních rozsahů uvnitř grafitového lisu způsobí krystalizaci větších zrn, a tím se zvýší účinnost článku. [5, 13]



Obr. 2.2 Monokrystalický a polykrystalický FV modul [14]

### 2.1.3 Články z amorfního křemíku

Články z amorfního křemíku patří mezi tenkovrstvé technologie. Oproti předchozím popsaným článkům mají tu výhodu, že ve velmi vysoké míře dokáží absorbovat světlo, a to asi 40 krát více než monokrystalický článek. Používají se články až 1  $\mu\text{m}$  tenké. Z toho důvodu jsou výrobní náklady na článek velmi nízké. Díky tomu, že je materiál tenký, lze články připravovat jako krycí ohebné fólie, nebo dokonce našívat na oblečení. Hlavní



výhodou je nepřehřívání v horkých letních měsících, které způsobuje pokles účinnosti. Účinnost článku se pohybuje jen kolem 7 %, v laboratorních podmínkách se účinnost zvýší na 12 %. Takto nízké hodnoty jsou způsobeny nepravidelnou krystalickou strukturou s větším množstvím poruch atomů křemíku. Moduly s těmito články lze na první pohled rozeznat tím, že mění barvu v závislosti na počasí a změnou pozorovacího úhlu pozorovatele. Amorfní křemík je technologie vhodná k použití na nevhodně orientovaných střechách, účinnost nepoklesne ani při zatažené obloze.

#### Technologie výroby

Výroba probíhá ve vakuové komoře, kde je amorfní křemík napařován při teplotách kolem 200 °C na nosné materiály. Podkladovým materiálem jsou sklo, kovy, plasty i fólie. [5, 3]

### 2.1.4 Další materiály pro FV články

Další materiály tvoří především tenkovrstvé materiály, které dokáží absorbovat stejné množství slunečního záření jako materiály s větší tloušťkou.

#### GaAs

GaAs je polovodičový materiál složený ze dvou prvků, As a Ga. Krystalovou strukturu má velmi podobnou křemíku, ale lépe absorbuje sluneční záření, a také má vyšší účinnost, zhruba 25 – 30 %. Další předností je vysoká odolnost vůči teplu, používají se proto v koncentrátorových systémech. Nevýhodou je toxicita As a vzácnost Ga, proto jsou náklady na výrobu článků vysoké. Články jsou oblíbené v kosmických aplikacích, kde je požadována vysoká účinnost a odolnost vůči radiačnímu poškození. [5, 11, 12]

#### CIS

Polykrystalické sloučeniny Cu, In a Se jsou polovodičové materiály pro tenké vrstvy. V současnosti s tímto materiálem probíhají výzkumy. Díky jeho dobrým vlastnostem se předpokládá širší využití pro komerční účely. Účinnost dosahuje 18 %. Až 99 % slunečního záření se absorbuje v prvním  $\mu\text{m}$  hloubky a netrpí tak velkou degradací materiálu

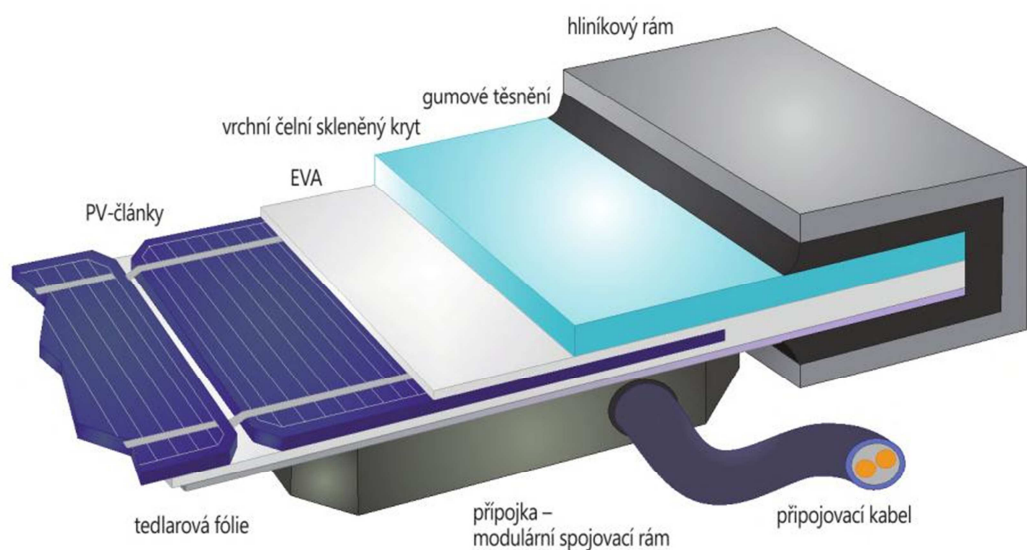
ve venkovních podmínkách, jako již zmíněné materiály. Nevýhoda materiálu vzniká při výrobě, neboť Se obsahuje H, který je toxický a extrémně hořlavý plyn. [5, 11, 12]

CdTe

Materiál polykrystalické sloučeniny Te a Cd dokáže absorbovat vysoké množství slunečního záření a až 90 % slunečního spektra v prvním  $\mu\text{m}$  hloubky. Účinnost se pohybuje kolem 14 %. Náklady na výrobu jsou nízké, materiál se stříká, tiskne nebo napařuje na nosný podklad. Nevýhodou sloučeniny je vysoká toxicita. [5, 11, 12]

## 2.2 Technologie výroby FV panelu

Fotovoltaický článek má napětí 0,6 – 0,7 V. V praxi se používá napětí řádově vyšší, proto jsou články zapojeny sériově a umístěny v panelu. Pro modul s napětím 18 V je nutno použít zapojení s 36 články, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2. Zapojené články je nutné chránit před vlhkostí a před mechanickým poškozením, protože jsou velice křehké a rychle podléhají oxidaci. Dokonalou těsnost článků zajišťují tenké transparentní fólie z etylen – vinyl acetátového polymeru (EVA), fólie se nanášejí na články laminací. EVA se vyznačuje dobrou pevností a velmi dobrou odolností vůči povětrnostním podmínkám. Vrchní ochranná vrstva tvoří vysoce transparentní sklo s velmi nízkou hodnotou odrazivosti a nízkým obsahem železa. To má za následek vyšší propustnost záření než běžné sklo stejných parametrů. Spodní vrstvu chrání také sklo nebo speciální fólie z Tedlaru.



Obr. 2.3 Řez konstrukcí FV panelu [14]

Tedlarová fólie zabraňuje propouštění vlhkosti, a tím i delaminaci. Zapouzdřená fólie a skleněná vrstva se spojují tlakem při teplotě 100 °C. Takto zhotovený panel je umístěn do pevného hliníkového rámu, který umožňuje instalaci panelu, a slouží jako ochranný prvek při zatížení větrem nebo sněhem. Drážka v rámu je zaplněna silikonovým těsnícím tmelem nebo těsněním z pryže. Propojení jednotlivých článků v panelu zajišťují přípojky umístěné na spodní straně. Někdy je součástí přípojky i bypassová dioda, která v případě poškození přemostí daný článek. [5, 13, 14]

### 3 Metody diagnostiky fotovoltaických článků

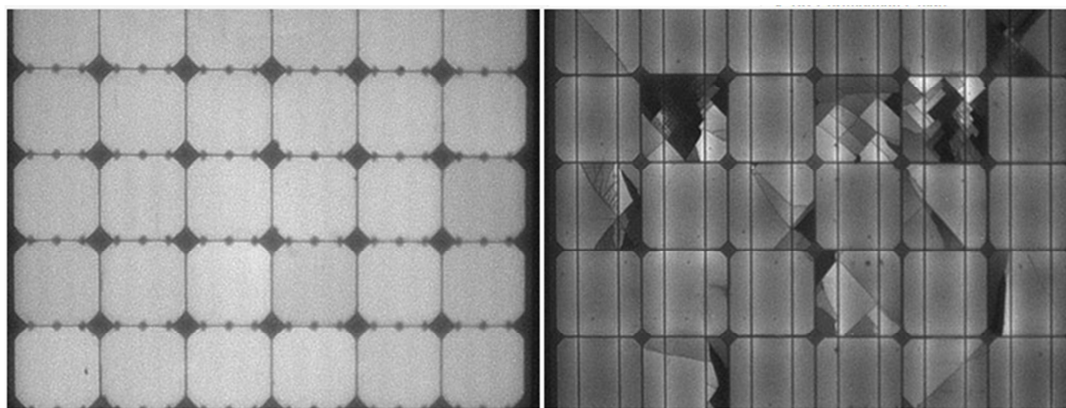
Na trhu je mnoho výrobců fotovoltaických panelů, přičemž každý výrobce má rozdílné výrobní technologie a kontroly kvality. Proto je vhodné použít různé metody diagnostiky článků ihned po koupi. Dalším krokem, jak snížit riziko investice do FV elektráren, je použití diagnostiky po instalaci panelů. Tímto krokem odhalíme závady vzniklé mechanickým stresem při dopravě, manipulaci a instalaci. Řada defektů nastává po letech používání v přírodních podmínkách. Pro zjištění poruchových stavů fotovoltaických článků se využívá laboratorní diagnostiky a diagnostiky článků v terénu.

#### 3.1 Laboratorní diagnostika

Laboratorní testování probíhá na specializovaných pracovištích, metody jsou drahé, ale umožní detailně testovat články. Vybrané diagnostické metody umožní zjistit výrobní vady v člancích jako je nehomogenita PN přechodu, vnitřní pnutí článku nebo vírový defekt.

##### 3.1.1 ELCD test

Cílem ELCD testu, neboli elektroluminiscenčního testu, je zjistit škody na FV článku způsobené ve výrobě nebo při manipulaci s ním. Připojením externího stejnosměrného napětí v propustném směru docílíme rekombinaci elektronů, což způsobí vyzařování fotonů v infračervené oblasti. Uvolněné fotony zachycuje záznamové zařízení s CCD čipem. Následně probíhá zpracování speciálním programem, které nám umožní převod infračerveného záření do viditelného spektra záření, získáme tak maximální kontrast. Použití CCD čipu je vhodnější oproti CMOS čipu z důvodu lepší kvantové efektivity. Tato metoda zviditelní mikrotrhliny a úlomky článků, které nelze ostatními metodami identifikovat. Mikrotrhliny způsobují menší životnost, a tím i pokles výkonu za výrazně kratší dobu. Na obrázku *Obr. 3.1*, je vyobrazen FV panel testovaný elektroluminiscenční metodou. Velká hustota rekombinačního procesu představují světlá místa, naopak poruchy a vady jsou vyobrazeny tmavším odstínem. Elektroluminiscenční metodou nelze měřit výkon panelu ani jednotlivých článků. [15]



Obr. 3.1 Porovnání FV panelu bez poruchy a s poruchou [16]

### 3.1.2 FLASH test

FLASH test představuje základní metodu, vyhodnocující výstupní parametry FV modulu a zajišťující funkčnost modulu. Měření probíhá za standardizovaných podmínek, kdy je panel vystaven na velmi krátkou dobu, obvykle 1 – 30 ms, záblesku světla. Záblesk o výkonu  $100 \text{ mW/cm}^2$  vychází z xenonové výbojky. Ta má spektrum velmi podobající se spektru slunečního záření, AM 1,5. Měřicí přístroje podléhají přísné kalibraci s referenčními FV panely. Výstupní hodnoty z měření jsou uvedeny v katalogovém listu a bývají uvedeny na štítku FV panelu. [17]

### 3.1.3 Měření VA charakteristik

Měření VA charakteristik probíhá ve specializovaných laboratořích, za stanovených podmínek měření. Metoda je velmi přesná, podává věrohodné informace o každém FV panelu, nicméně je časově náročnější. Kvalita panelu se posuzuje podle výstupních grafů z měření. Diagnostická metoda přesně určí základní parametry FV panelu. [18]

### 3.1.4 Fotoluminiscenční test

Princip metody fotoluminiscence spočívá ve vyvolání vlastního luminiscenčního záření FV článku externím zdroje monochromatického záření s konstantní vlnovou délkou. Vlnová délka luminiscenční emise musí být větší, nebo alespoň rovna vlnové délce vnějšího zdroje záření. S touto závislostí penetrují fotony vnějšího zdroje do určité hloubky P-N přechodu. Nejčastěji se využívají laserové diody nebo pole LED diod. Vyvolání luminiscenční emise také závisí na energii záření externího zdroje, kdy musí být minimálně 1,12 eV. Postup měření je velmi podobný jako u metody elektroluminiscence. Emitované záření je zaznamenáno kamerou s CCD čipem, pořízená data jsou následně zpracována

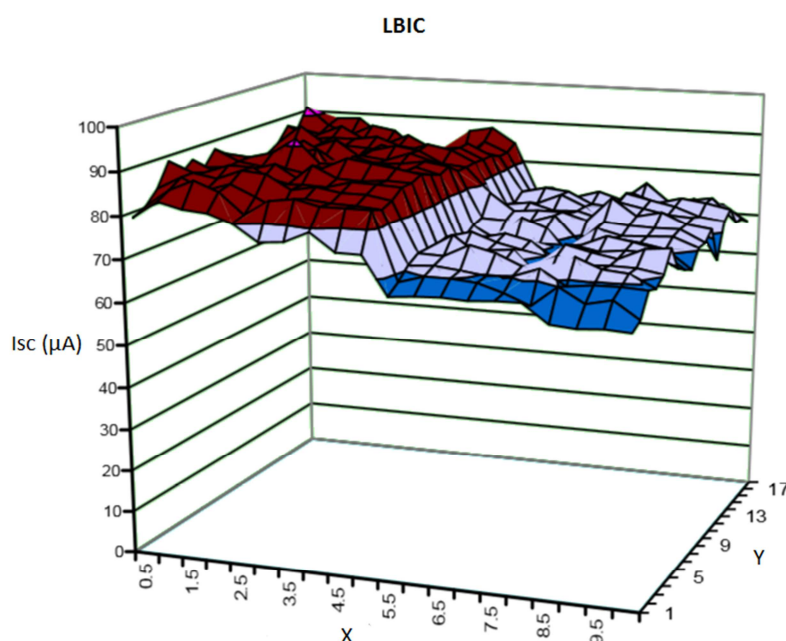
a vyhodnocena v počítačovém programu. Tento fotoluminiscenční test zviditelní defekty na článku, které způsobují pokles výkonu. Jedná se o pravidelné tmavé skvrny, jak lze vidět na obrázku *Obr. 3.2.* [19]



*Obr. 3.2 Článek měřený metodou fotoluminiscence, převzato [19]*

### 3.1.5 Metoda LBIC a LBIV

Obě tyto metody byly založeny pro diagnostiku homogenity PN přechodu článků. Metodou LBIC měříme zkratový proud  $I_K$ , zatímco metodou LBIV měříme napětí naprázdno  $U_L$ . Metody využívají externího zdroje záření monochromatickým světlem vhodné vlnové délky, podobně jako metoda fotoluminiscence. Článek je osvětlován a zároveň měřen

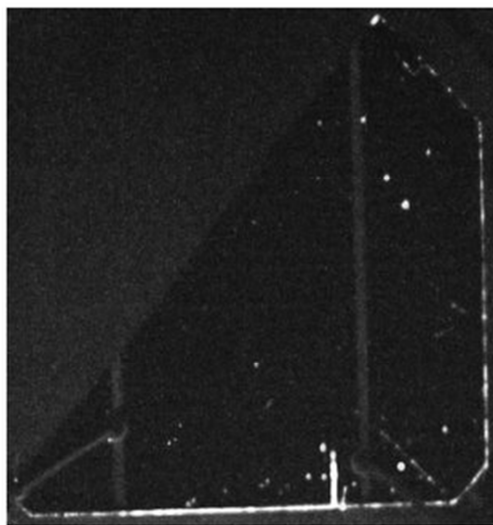


*Obr. 3.3 Výsledky z LBIC měření, převzato [21]*

v jednotlivých souřadnicích. Naměřeným výstupem je matice, která v počítačovém zpracování dokáže vykreslit 3D graf v závislosti na zkratovém proudu nebo napětí naprázdno. Z takového snímku jsme schopni zjistit vady na článku. Měřicí metoda je závislá na velikosti vlnové délky, kroku přesnosti a teplotě článku. [20, 21]

### 3.1.6 Metoda luminiscenční mikroplazmy

Metoda využívá detekci luminiscenčního šumu mikroplazmy v místech strukturálních defektů při závěrném napětí. Napětí musí mít velikost blíží se hodnotě průrazného napětí. Šum mikroplazmy vzniká v místě nedokonalé krystalové mřížce PN přechodu, kde dochází k lavinovému průrazu. Vzniklý šum je doprovázen emitací fotonů, které jsou zachyceny kamerou s CCD čipem. Získaná data z kamery jsou následně zpracována v počítači pro lepší identifikaci poruchy. Velká hustota emitovaných fotonů je vyobrazena na snímku světlou barvou. [22]



Obr. 3.4 Snímek pořizen při měření metodou luminiscence mikroplazmy [22]

### 3.1.7 Izolační zkouška

Izolační zkouška patří mezi bezpečnostní zkoušky, kdy se měří hodnota izolačního odporu mezi FV článkem a rámem panelu. Izolační odpor musí odpovídat požadavkům normy ČSN EN 61215 ed. 2. Nedostatečná izolace může být způsobena nízkou kvalitou lepicího laminátu nebo příliš malou roztečí mezi články. Měření se provádí měřidlem izolačního stavu k tomu určenému. Měří se při zkratovaných výstupních konektorech, na které je převedeno kladné stejnosměrné napětí. Záporný pól je přiveden na konstrukci

modulu. Stejnoseměrné napětí má hodnotu dvojnásobku maximálního napětí daného výrobcem zvýšenou o 1000 V. Tato hodnota je udržována po dobu 1 minuty. Izolační odpor u modulu s plochou menší než 0,1 m<sup>2</sup> musí vykazovat hodnotu minimálně 400 MΩ. Moduly s plochou větší než 0,1 m<sup>2</sup> mají izolační odpor nejméně 40 MΩ na 1 m<sup>2</sup>. [23]

### 3.1.8 Klimatické zkoušky

Klimatické zkoušky zahrnují pravidelné teplotní cykly, které umožní urychlit zestárnutí modulů. Testování se provádí v klimatických komorách dle normy ČSN EN 61215 ed. 2. Modul je změřen před testováním a po testování. K měření patří vizuální kontrola, kontrola izolačního odporu, měření VA charakteristiky, ELCD a FLASH test. Testovací cyklus probíhá v rozmezí teplot -40 °C ± 2 °C a 85 °C ± 2 °C. Počet testovacích cyklů je 50, kdy čas jednoho testovacího cyklu nesmí překročit dobu 6 hodin. Čas při ustálené teplotě je minimálně 10 minut a rychlost změny od ustálených hodnot teplot nesmí být vyšší než 100 °C za hodinu. Vlivem zestárnutí dochází k odhalení skrytých vad, které by se projevíly při provozu ve venkovních podmínkách. [24]

## 3.2 Diagnostika v terénu

Testování v terénu umožní testovat FV články, aniž by musely být odpojeny od sítě, a být převáženy na specializované měřicí pracoviště.

### 3.2.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola patří mezi základní a prvotní zkoušky, provést ji lze pouhým zrakem. Lze identifikovat praskliny, lomy, zastínění i delaminaci na článcích nebo modulech. Moduly při této kontrole není nutné odpojit od sítě. Vizuální kontrola se nejčastěji provádí po výrobě, dopravě a instalaci FV modulu. Je to nejlevnější a ve většině případů i nejúčinnější metoda diagnostiky vad, dokáže předcházet i nákladným laboratorním testům. [25]

### 3.2.2 Solární analyzátory

Solární analyzátory jsou komplexní přístroje dodávané s měřicími sondami. Umožňují změřit všechny aktuální elektrické a fyzikální veličiny charakteristické pro FV panel. Mezi hlavní přednosti patří rozměr, hmotnost a široká možnost měření. Přístroje dokáží změřit VA charakteristiku, maximální výkon, napětí naprázdno, napětí pro maximální výkon,



zkratový proud a proud pro maximální výkon. Některé dokáží výpočet účinnosti FV panelu, úhel sklonu panelu a aktuální osvit FV panelu. [26]

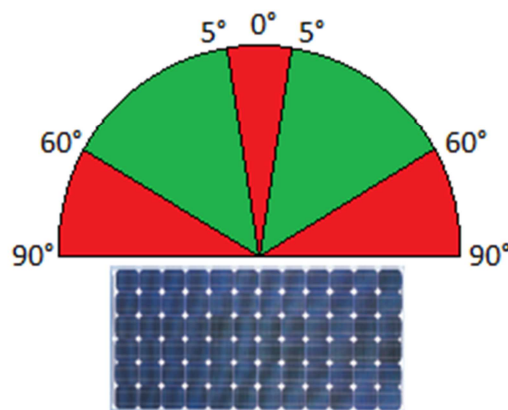
### 3.2.3 Termografie

Termografické měření se provádí pomocí termokamery. Jedná se o nejrozšířenější a nejspolehlivější diagnostickou metodu používanou během provozu. Vadné články lze snadno identifikovat z pořízeného termografického snímku FV panelu. Vykazují totiž podstatně vyšší teplotu oproti článkům bez poruchy. Metodou termografického měření lze zjistit nejenom vadné články ale například i vadné bypassové diody, vadné zapojení modulů nebo nečistoty způsobené ptačím trusem. Tyto poruchy se vyznačují horkým místem. Poruchová místa dosahují v praxi teplot vyšších než 100 °C, proto lze metodou termografie předejít i případnému požáru. Pro správné měření a správné vyhodnocení výsledků je nutné dodržovat určitá pravidla, která jsou popsána v následující kapitole. [27, 29, 30]

## 4 Použití termografie pro analýzu FV článků

Jak již bylo zmíněno, termografické měření je prováděno během provozu, v terénu. K efektivnímu dosažení správných výsledků je potřeba minimální sluneční záření o hodnotě  $500 \text{ W/m}^2$ . Doporučováno je pak  $700 \text{ W/m}^2$ . Pokud je jasná obloha bez výskytu mraků, dosahuje sluneční záření intenzity až  $1100 \text{ W/m}^2$ . Intenzitu slunečního záření měříme pyranometrem. Pro měření jsou vhodné nižší venkovní teploty a obloha s minimálním výskytem mraků. Ty mohou způsobovat rušivé odrazy na snímcích.

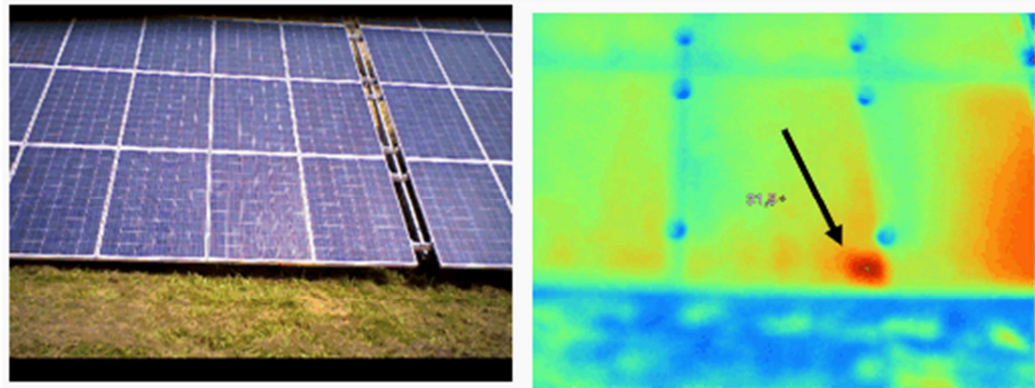
Ne všechny termokamery jsou vhodné pro měření. Méně vhodné pro měření FV panelů jsou termokamery s nechlazeným detektorem typu mikrobolometr. Detektor je citlivý ve spektrálním pásmu  $8 - 14 \mu\text{m}$ . V tomto pásmu se ochranné sklo panelu chová pro termokameru jako neprůhledné, měření teploty probíhá na skle panelu a rozdílnost teplot není tak zřejmá. Vhodnější jsou proto termokamery s fotonovým detektorem. Takové detektory však vyžadují chlazení a jsou finančně nákladnější. Pokud máme k dispozici termokameru a vhodné podmínky k měření, musíme při měření dosáhnout správného úhlu mezi FV panelem a termokamerou, abychom omezili chyby měření způsobené emisivitou. Měření by mělo probíhat v rozmezí mezi  $5^\circ - 60^\circ$ , kolmý pohled je označen nultým stupněm. [28, 29, 30]



Obr. 4.1 Doporučené pozorovací úhly při měření [30]

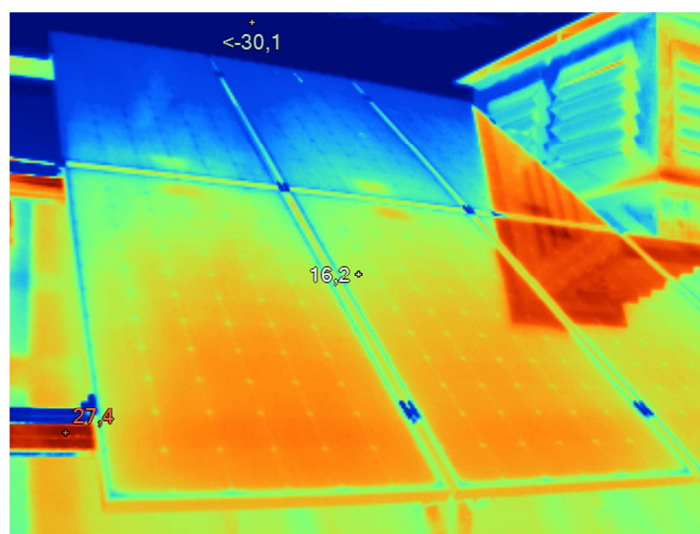
Během měření mohou vzniknout chyby. Mezi nejčastější chyby měření se řadí tzv. falešné hot – spoty, tedy falešná místa s vysokou teplotou, které chybně identifikujeme jako poruchu. Falešná horká místa jsou zapříčiněna nedodržením pravidla pro natočení

termokamery vůči FV panelu, nebo vznikají odrazem mraků, odrazem Slunce, popřípadě částečným zastíněním vyššími okolními budovami.



Obr. 4.2 Vadný FV článek [27]

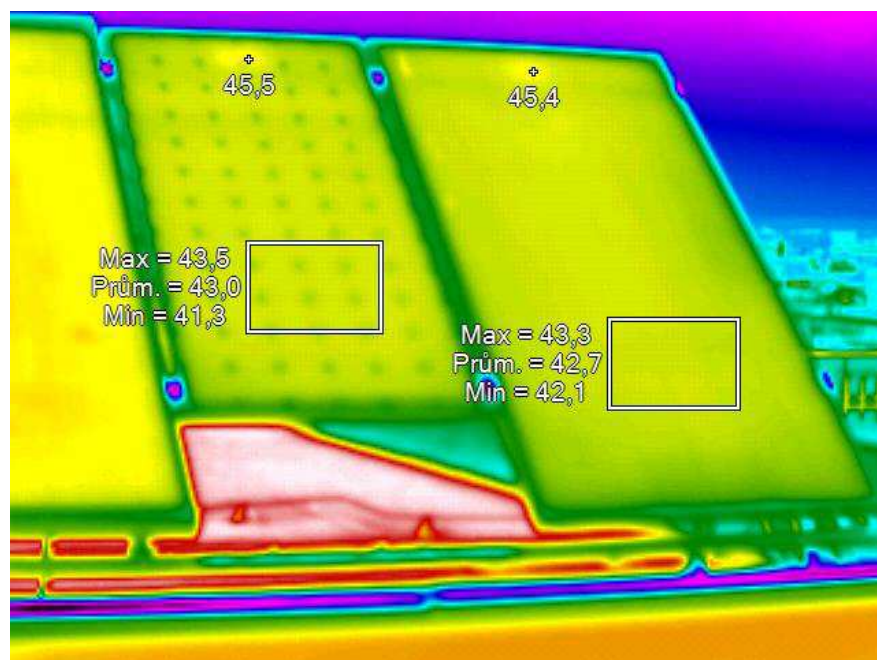
Poruchy, popřípadě vady, jsou, jak již bylo řečeno, viditelné jako teplá místa. Ta však mohou mít různý tvar. Identifikují několik různých poruch. Jedná-li se o FV panel vyznačující se vysokou teplotou na celé jeho ploše, nastala zde chyba s připojením. Teplá místa jednotlivých článků nebo řetězce článků označují vady zapříčiněné vnitřním poškozením článků nebo vnitřním zkratem. Pro poruchy bypassové diody je charakteristický tzv. mozaikový vzor. Zastínění budovami nebo mraky je na termografickém snímku vidět jako obrazce s rozdílnou teplotou, viz Obr. 4.3. Pokud chybně identifikujeme článek z přední strany, je vhodné provést měření i ze spodní strany FV panelu a oba snímky porovnat. Takto získáme důvěryhodné informace o stavu panelu. Vadné panely nebo články musí projít vizuální kontrolou, popřípadě kontrolou elektrickou, pro úplnou identifikaci vady. [29, 30]



Obr. 4.3 Ukázka termografického snímku s falešnými hot-spoty, způsobené odrazem

## 4.1 Měření FV panelů

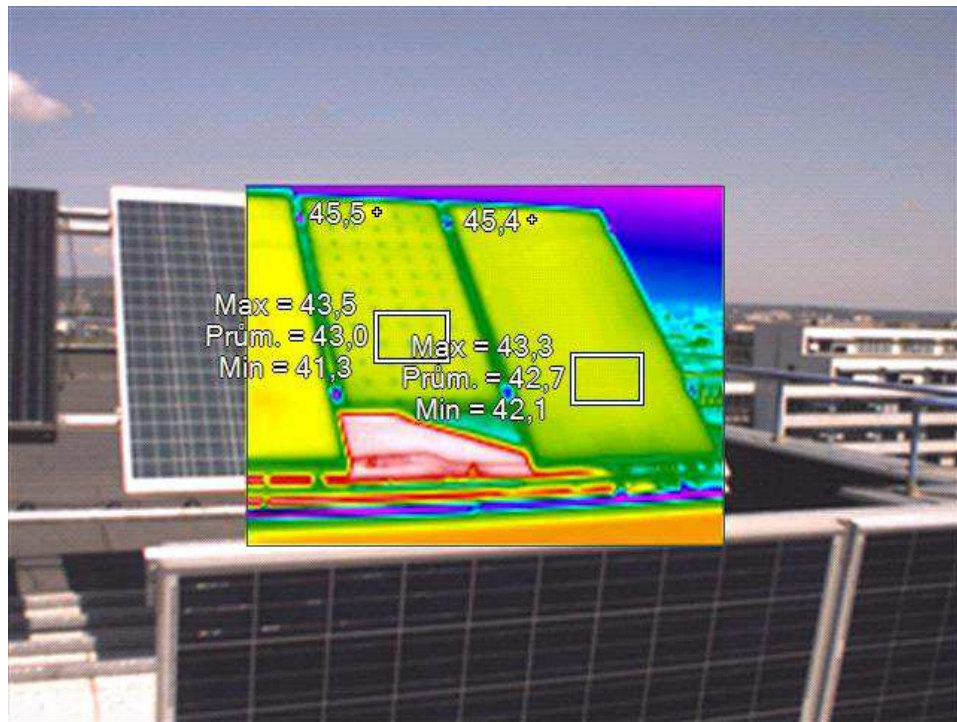
Měření pomocí termokamery jsem provedl na předváděcích FV panelech umístěných na budově Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. K samotnému měření jsem měl k dispozici termokameru FLUKE Ti55FT a software SmartView 2.0 sloužící pro konečnou analýzu a korekci pořízených snímků. Termokamera disponuje mnoha funkcemi, například funkcí Fluke IR-Fusion, která sloučí infračervený obraz o velikosti 320 x 240 pixelů s obrazem viditelného záření o velikosti 1280 x 1024 pixelů. Dále zmíním funkci SmartFocus, tedy funkce neustálého automatického zaostřování měřeného objektu. Termokamera měří v teplotním rozsahu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$  s teplotní citlivostí  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vzhledem k tomu, že termokamera disponuje nechlazeným detektorem typu mikrobolometr, byla nutná řádná analýza pořízených snímků. Během měření jsem neobjevil žádný poruchový panel, ani článek, který by vykazoval velmi zvýšenou teplotu, pouze panel znečištěný ptačím trusem vykazoval horká místa.



Obr 4.4 FV panely bez poruch (uvedené teploty jsou v  $^{\circ}\text{C}$ )

Z pořízených termografických snímků, znázorněných na obrázku Obr. 4.4 vidíme FV panely bez vad, vlevo monokrystalický, po pravé straně polykrystalický. Vyznačené čtverce jsou oblasti měření teploty. Uvedené teplota představuje maximální, minimální a průměrnou hodnotu uvedenou ve stupních Celsia. Horká místa na vrchu panelu jsou

způsobena odrazem. Snímek na obrázku *Obr. 4.5* poukazuje na funkci Fluke IR-Fusion, tzv. obraz v obraze.



*Obr. 4.5* Vyobrazení funkce Fluke IR-Fusion (uvedené teploty jsou v °C)

Na obrázku *Obr. 4.6* je vyobrazen snímek polykrystalického FV panelu s články částečně zastíněnými ptačím trusem. Taková vada představuje snížení účinnosti a vznik horkých bodů.



*Obr. 4.6* Polykrystalický panel znečištěný ptačím trusem (uvedené teploty jsou v °C)

## Závěr

Cílem bakalářské práce byla analýza a využití termografické metody pro diagnostiku fotovoltaických článků (panelů).

Na základě popisu vlastností a technologie výroby fotovoltaických článků bylo zjištěno, že fotovoltaika, jako obnovitelný zdroj energie, má řadu výhod i nevýhod. Významnou výhodou jsou nulové emise při přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Nesporné jsou minimální náklady na údržbu instalovaných fotovoltaických elektráren. Je zde také vysoká trvanlivost, jejímž předpokladem jsou pravidelné kontroly a údržba. Důležitou výhodou je nulový hluk při přeměně záření na elektrickou energii a téměř nevyčerpatelný zdroj záření.

Mezi nezanedbatelné nevýhody patří vysoké pořizovací náklady a náklady na ekologickou likvidaci. V České republice je nevýhodou také poměrně krátká doba slunečního svitu během roku a nízká intenzita slunečního záření. Ta má za následek nevyužití maximálního výkonu fotovoltaických elektráren. Závažný je také fakt nízké účinnosti komerčně vyráběných panelů. Bylo konstatováno, že účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii rapidně klesá se zvyšující se teplotou modulu.

Jako nezbytné se jeví včas rozpoznat a odstranit závady či poruchy fotovoltaických článků. K tomu slouží různé diagnostické metody. Termografie je jedna z diagnostických metod. Je velmi vhodná pro vysokou flexibilitu využití, dále také pro možnost měření velkých ploch bez nutnosti odpojení panelů od sítě. Pořízené termosnímky z měření jsou přesné, přehledné. Je možné je dále upravovat v softwaru k tomu určeném. Významnější nevýhodou je zajištění optimálního slunečního záření, které je ovlivněno počasím. Metodu termografie jsem aplikoval v praxi, při diagnóze stavu fotovoltaických panelů na budově Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Průběh a výsledky měření jsem zaznamenal v poslední kapitole této práce.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] FEJFAR, Antonín. HISTORIE A PERSPEKTIVY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ PRO VYUŽITÍ SLUNEČNÍ ENERGIE. In: Matematika, fyzika - minulost, současnost: sborník z XII. semináře o filozofických otázkách matematiky a fyziky: Velké Meziříčí, srpen 2004. V Brně: VUTIUM, 2006, 70 - 80. ISBN 80-214-3208-x.
- [2] CRADDOCK, David. Renewable energy made easy: free energy from solar, wind, hydropower, and other alternative energy sources. Ocala, Fla.: Atlantic Pub. Group, c2008, 287 p. ISBN 16-013-8240-5.
- [3] Solární (fotovoltaické) články. Skupina ČEZ [online]. Neuvedeno [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [4] Z historie fotovoltaiky. CZECHSOLAR S.R.O. Fotovoltaické elektrárny - Czechsolar s.r.o. [online]. Neuvedeno [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/z-historie-fotovoltaiky/>
- [5] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. Fotovoltaika, elektřina ze slunce. 1. vyd. Brno: ERA, 2007, vii, 81 s. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [6] BEISER, A. Úvod do moderní fyziky. Vyd. 1. Praha: Academia, 1975, 632 s. Ostmark.
- [7] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. PVEducation [online]. 2011 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org>
- [8] NELSON, Jenny. *The physics of solar cells*. London: Imperial College Press, 2003, xix, 363 s. ISBN 18-609-4340-3.
- [9] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Fyzikální podstata přechodu PN. *Fyzika :: MEF* [online]. 2009 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn>
- [10] KYOCERA SOLAR EUROPE, s.r.o. KD245GH - 2PB: Vysokovýkonné polykrystalické fotovoltaické moduly. Neuvedeno, 2011. Datasheet.
- [11] HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2011, 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [12] HERAUSGEGEBEN VON MARTIN KALTSCHMITT, Wolfgang Streicher. Erneuerbare Energien Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 5. Aufl. 2013. erweiterte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-364-2032-493.
- [13] CENKA, Miroslav aj. Obnovitelné zdroje energie. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001, 208 s. ISBN 80-901-9858-9.
- [14] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

- [15] MAĎAR, František. Solar service. *ELCD test* [online]. 2011 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: [http://solarservice.sk/?page\\_id=15](http://solarservice.sk/?page_id=15)
- [16] ROOIJ DE, Dricus. Quality control: ELCD test. *Solar Energy and China: Mounting structures, PV quality, Solar cells and BIPV* [online]. 2011 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://sinovoltaics.com/quality-control/quality-control-elcd-test-electroluminescence-crack-detection-test/>
- [17] MAĎAR, František. Solar service. *Flash test* [online]. 2011 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: [http://solarservice.sk/?page\\_id=16](http://solarservice.sk/?page_id=16)
- [18] Měření VA charakteristiky. SOLARTEC S. R. O. *PV test web* [online]. 2012 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.pvtest.cz/cs/zkousky/mereni-va-charakteristiky>
- [19] BAURA, T. Analýza fotovoltaických článků pomocí fotoluminence. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 76 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [20] Microelectronics, 2008. MIEL 2008. 26th International Conference on. In: SALINGER, Jan, Vitezslav BENDA a Zdenek MACHACEK. *A note on solar cell diagnostics using LBIC and LBIV methods*. 2008, 217 - 220. DOI: 10.1109/ICMEL.2008.4559262.
- [21] *Journal of Basic and Applied Scientific Research JBASR*. Neuvedeno: Neuvedeno, Neuvedeno. ISBN 2090-424X.
- [22] VANĚK, Jiří. DIAGNOSTICKÉ METODY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ. *Odborný portál pro profesionály v oblasti stavebnictví* [online]. 2010 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku>
- [23] SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. *Panelová technika*. Praha, 2011. Nepublikovaný dokument.
- [24] Zkouška teplotním cyklováním. SOLARTEC S. R. O. *PV test web* [online]. 2012 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.pvtest.cz/cs/zkousky/zkouska-teplotnim-cyklovanim>
- [25] Vizuální kontrola. SOLARTEC S. R. O. *PV test web* [online]. 2012 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.pvtest.cz/cs/zkousky/vizualni-kontrola>
- [26] ONDŘÍK, Jiří. Analyzátor funkce a účinnosti solárních instalací. *ELEKTRO*. 2010, roč. 2010, 8-9. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/pdfclick.php?id=41904>
- [27] Termovizní měření a VA charakteristika. *Výzkumné energetické centrum, VŠB-TU Ostrava* [online]. 2011 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/cz/energeticke-sluzby/monitoring/sunny-guard/termovizni-mereni-a-va-charakteristika.html>
- [28] VOJÁČEK, Antonín. Měření a regulace: Co jsou BOLOMETRY a MIKROBOLOMETRY ?. *Elektronika v automatizaci* [online]. 2005 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111601>



[29] RYŠÁNEK, Jiří. Revize a měření fotovoltaických elektráren a FV panelů. *Termografie, měření úniku tepla, měření teploty termokamerou* [online]. 2012 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.mereni-termovize.cz/sluzbyFotovoltaika.php>

[30] Kontrola solárních panelů. GEOTRONICS PRAHA, s.r.o. *GEOTRONICS Praha, s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.geotronics.cz/termokamery/kontrola-solarnich-panelu>