

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

Diplomová práce

Analýza vadných fotovoltaických panelů

Bc. Marek Stránský

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek STRÁNSKÝ**
Osobní číslo: **E12N0151P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Analýza vadných fotovoltaických panelů**
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. Zhodnoťte technické možnosti využívání solárního záření.
2. Analyzujte možné vady a poškození fotovoltaických panelů.
3. Proveďte a zhodnoťte měření reálných panelů.

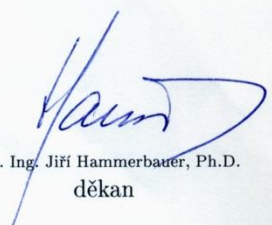


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

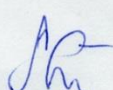
1. přednášky KEE/SOES

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na analýzu vadných fotovoltaických panelů. V úvodu jsou popsány důležité fotovoltaické procesy. Následně se práce zabývá rozdělením a výrobou fotovoltaických článků. Jedním z cílů práce bylo analyzovat možné vady a poškození fotovoltaických panelů. V závěru je provedeno měření závislosti výkonu panelu na zastínění a porovnání funkčního a defektního panelu.

Klíčová slova

Fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, defekt, degradace, typy solárních článků, fotoelektrický jev, parametry panelů.

Abstract

The master theses is focused on the analysis of defective solar panels. The introductions explains important photovoltaic processes. Then the work handle with distribution and production of photovoltaic cells. One of the objective of this work was to analyze the possible defects and damage of photovoltaic panels. In conclusion is the measurement where is shown dependence on power of photovoltaic panel to shading and comparison of functional and defective panel.

Key words

Photovoltaic cell, solar panel, defect, degradation, types of solar cells, photoelectric effect, parameters of panels.

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 12.5.2014

Marek Stránský

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
ÚVOD	8
1 FOTOELEKTRICKÝ JEV	9
1.1 FOTOEMISE	9
1.2 FOTOVODIVOST	9
1.3 FOTOVOLTAICKÝ JEV	10
2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY	12
2.1 TYPY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	12
2.1.1 První generace (wafer based)	13
2.1.2 Druhá generace (thin film)	14
2.1.3 Třetí generace	14
2.2 VÝROBA SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	15
2.3 PARAMETRY PANELŮ	17
3 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A PANELŮ	19
3.1 DEFEKTY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	20
3.1.1 Popis defektů solárních článků	20
3.1.2 Degradace solárních článků dopadajícím zářením	24
3.2 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ	25
3.2.1 PID – Potenciální indukovaná degradace	25
3.2.2 Šnečí cestičky	26
3.2.3 Delaminace	28
3.2.4 Horká místa	29
3.2.5 Zastínění	30
3.2.6 Proražení/vyhoření bypassové diody	31
3.2.7 Kabeláž	31
3.2.8 Nevhodné jištění	32
3.2.9 Přechodové odpory	33
3.2.10 Vliv povětrnostních a klimatických podmínek	34
4 MĚŘENÍ PANELŮ NA ZČU	35
4.1 MĚŘENÍ ZASTÍNĚNÍ NA FVE ZČU	35
4.2 POROVNÁNÍ FUNKČNÍHO A NEFUNKČNÍHO PANELU	38
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY	41

Seznam symbolů a zkratek

E [J]	energie
h [J·s]	Planckova konstanta ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s)
ν [Hz]	frekvence elektromagnetického záření
c [m/s]	rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s)
λ [m]	vlnová délka [m]
EPT	energy payback time
$V-A$	voltámperová
I_{SC} [A]	zkratový proud
I_L [A]	proud generovaný světlem
U_{OC} [V]	napětí naprázdno
P_{MPP} [W]	maximální výkon
MPP	bod, ve kterém se nachází maximální výkon ve V-A charakteristice
FF	fill factor
μ [%]	účinnost
E [lx]	intenzita osvětlení
A_C [S]	plocha FV článku
R_m [Ω]	vnitřní odpor
U_m [V]	napětí, při kterém dodává článek maximální výkon
I_m [A]	proud, při kterém dodává článek maximální výkon
$ELCD$	elektroluminescenční metoda

Úvod

Slunce je trvalým zdrojem energie pro naši planetu, proto je velice výhodné tuto energii umět zpracovat. V dnešní době využíváme fototermální přeměnu a to zejména v kolektorech, a přeměnu tepelné energie na energii elektrickou ve fotovoltaických panelech. Věda, která se zabývá přeměnou tepelné energie na energii elektrickou, se nazývá fotovoltaika a její počátky sahají až do 19. století. Hlavní skok však zaznamenala až v posledních 20 až 30 letech. Úkolem předkládané diplomové práce je nastudování technických možností fotovoltaických panelů a zhodnocení možných defektů, které by ovlivnily funkci panelů. Zabývá se vznikem defektů při výrobě, přes manipulaci až po defekty při provozu.

Fotovoltaické panely mohou být degradovány různými defekty. Těmito defekty je například delaminace, proražení či vyhoření bypassové diody, degradace tenkovrstvých panelů, praskliny, horká místa, vadné pájení přechodových odporů, lokální zkraty ve struktuře solárních článků, šnečí cestičky atd. Všemi těmito vadami bych se tedy chtěl nadále zabývat. Pro praktickou část diplomové práce jsem si vybral fotovoltaické panely umístěné na budově ZČU. Budu porovnávat dva panely stejného typu - fungující a rozbitý. Další měření se bude zabývat vlivem stínění na fotovoltaický panel.

1 Fotoelektrický jev

V roce 1839 byl objeven Alexandrem E. Becquerelem fotoelektrický jev a následně v roce 1905 Albertem Einsteinem popsán vnější fotoefekt, tedy fotoemise. Za tento objev dostal Nobelovu cenu. V dnešní době není znám pouze Einsteinův vnější fotoefekt, ale také fotoefekt vnitřní, který se skládá z fotovodivosti a z fotovoltaického jevu. [1,2]

1.1 Fotoemise

Každé záření je charakterizováno korpuskulárně vlnovým dualismem, tedy že se dané záření může chovat jako částice tak i jako vlnění. Je složeno z částic (fotonů), které v určitých podmínkách vykazují vlastnosti vlnění. Energie, kterou nesou částice, je dána následujícím vztahem (1.1):

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Po dodání takovéto energie na povrch materiálu se mohou valenční elektrony z krystalické mřížky odtrhnout. Avšak nezáleží pouze na energii, ale také na vlnové délce záření a vlastnostech materiálu. [1,2]

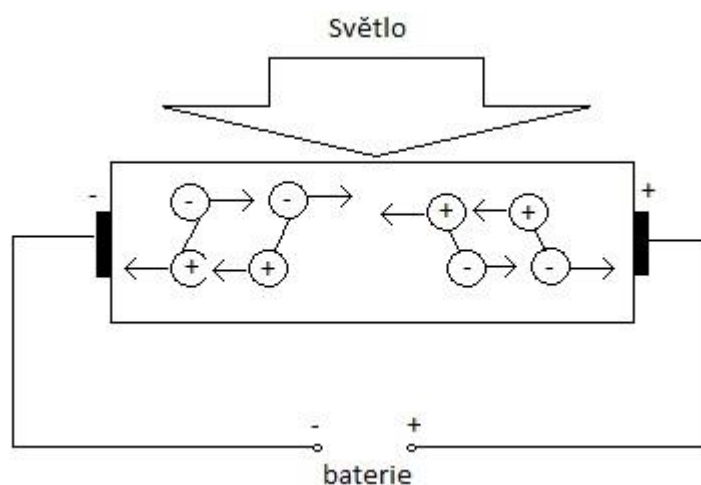
1.2 Fotovodivost

Fotovodivost je zvýšení elektrické vodivosti absorpcí kvanta záření uvnitř pevné látky, tedy pohlcení elektromagnetického záření. Po této absorpci může být některý elektron vázaný v pevné látce vybuzen do vyššího energetického stavu, tudíž se z něj stává volný elektron. Tento elektron následně může zprostředkovávat zmíněnou vodivost. [1,2]

Některé krystalické polovodiče, jako jsou například křemík, germanium, sulfid olova atd., jsou poměrně špatné vodiče, avšak po dodání dostatečně velké externí energie přecházejí do vodivostního pásu. Tato energie musí být dostatečně velká na to, aby elektrony překonaly zakázané pásmo. [1,2]

Jestliže připojíme k takovému materiálu baterii (Obr. 1.1), dojde k transportu náboje a obvodem poteče proud. Záření tedy podporuje vznik tohoto proudu, který je v podstatě zajištěn baterií. Přímá přeměna energie záření na elektrický proud zde ještě nenastává. Energie záření se sice mění na energii elektronů uvnitř látky, ale energie nutná k tomu, aby nastal jejich usměrněný pohyb, tj. elektrický proud se odebírá z baterie. Aby působením

záření mohly vznikat volné náboje, musí energie dopadajících kvant stačit na to, aby překonala energetický rozdíl mezi valenčním pásem a vodivostním pásem polovodiče. [2]



Obr 1.1 Fotovodivost

1.3 Fotovoltaický jev

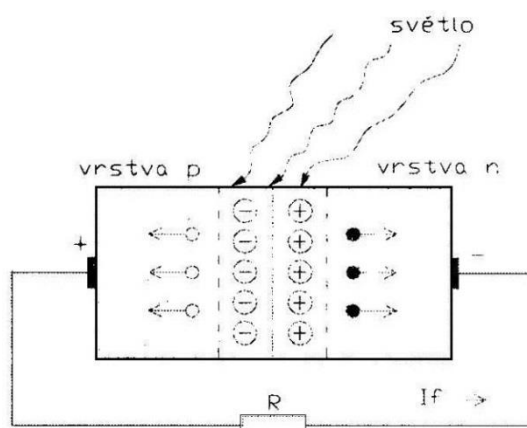
K přeměně energie slunečního záření na elektrickou energii, potřebujeme zejména volné elektrony a elektrický potenciál, který je uvede do pohybu. Tyto volné elektrony jsou přítomny v každém kovu. Avšak je zde komplikace, jak elektronům dodat potřebnou energii a jak tok potřebným směrem usměrnit. [2,3,4]

Jestliže na povrch kovu dopadá záření, dochází k uvolnění elektronů. Pokud je energie dostatečná, elektron vylétne z mřížky a zanechá po sobě kladný náboj neboli díru. Pokud energie není dostatečná, elektron je přitážen zpět k díře a energie je vyzářena ve formě neúčinného tepla. Pro efektivní účinnost je nutné, abychom zajistili, že před navrácením do děr, prošly elektrony elektrickým obvodem. To zajistíme využitím polovodičů. Polovodiče jsou látky svými vlastnostmi ležící mezi kovy a izolanty. Rozdíl mezi polovodiči a kovy je ten, že polovodiče nemají volné elektrony, které však mohou vzniknout buď zahřátím, nebo po dopadu slunečního záření. K oddělení elektronů z děr je nutné, aby v polovodičích vznikl P-N přechod. [2,3,4]

Nejběžnějším polovodičovým materiálem je křemík, který sám o sobě nemá volné elektrony. Jeho kovalentní vazby však nejsou tak pevné, a proto stačí poměrně malé množství energie k uvolnění elektronů z vazeb. Křemík v malé míře vede elektrický proud i při pokojové teplotě, protože energie je dostatečná na to, aby některé elektrony z valenčního pásu excitovali do pásu vodivostního. Se zvyšující se teplotou vodivost roste. Pokud ho však ještě

záměrně znečistíme určitými cizími atomy, může výsledná sloučenina získat žádoucí elektrické vlastnosti. Dotace se provádí nejčastěji troj či pěti mocnými prvky a mění se v širokých mezích podle toho, jaká se požaduje výsledná vodivost materiálu. [2,3,4]

Pokud přidáme jeden atom příměsi na 10^6 Si, výsledná vodivost se změní velice silně. Při pokojové teplotě je v 1mm^3 Si 10^{16} nosičů náboje. Po dodání cizích atomů jejich koncentrace vzroste od 10^{18} do $10^{22}/\text{mm}^3$. Takoveto polovodiče poté nazýváme dotované, neboli příměsové. Např. může připadat jeden atom příměsi na 10^6 atomů Si. Výsledná vodivost se mění dotací velmi silně. Při pokojové teplotě je v 1mm^3 Si 10^{16} nosičů náboje, vlivem dotace se jejich koncentrace zvýší od 10^{18} do $10^{22}/\text{mm}^3$. Tyto polovodiče se nazývají dotované (příměsové). U dotovaných polovodičů je při pokojové teplotě počet nábojů a tím i vodivost na teplotě prakticky nezávislá. Vodivost se u nich mění pouze při nízkých teplotách. Křemík má čtyři valenční elektrony, takže příměsi mohou být, jak již bylo zmíněno trojmocné či pětímocné prvky. Pokud je příměsí fosfor, antimon či arsen, tak je na pozici místo čtyř valenčního křemíku zabudován pětímocný atom. Pro vazbu v mřížce je však potřeba pouze čtyř elektronů. Pátý elektron je tedy volný a krouží kolem svého atomu (např. Sb), ke kterému je vázán velice slabě, a tak energie, která je potřebná dodat k jeho odtržení je také poměrně malá. Vzniká tedy volný záporný nosič. Majoritním nosičem proudu jsou v takoveto látce elektrony. To jsou polovodiče typu N – negativní. Jestliže je do křemíku přidán trojmocný prvek, jako např. bór, hliník, galium nebo indium, převažují zde díry, protože čtvrtý valenční elektron chybí a je dodán ze sousedního atomu křemíku. V takovýchto sloučeninách jsou pak majoritními nosiči díry a elektrony jsou pouze nosiči minoritními. Tato vodivost se nazývá vodivost typu P – pozitivní. Pokud na sebe krystalické mřížky těchto dvou typů navazují, vznikne hraniční vrstva, kde mohou volné nosiče náboje volně difundovat. To vidíme na Obr. 1.2 [2,3,4]

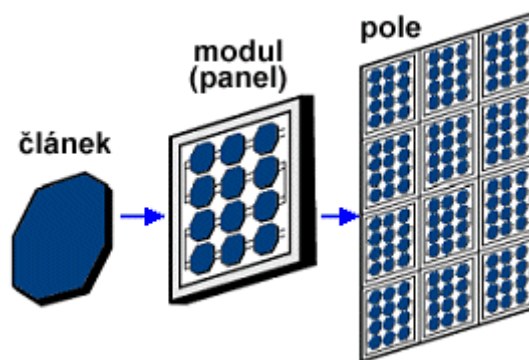


Obr. 1.2 Fotovoltaický jev [2]

2 Fotovoltaické články a panely

Samotný solární článek je velkoplošný polovodičový konstrukční prvek, který je schopen přeměňovat světlo na elektrickou energii. Každý takový článek se skládá z polovodičového materiálu, kovových kontaktů a z tenké vrstvy materiálu, který slouží ke zlepšení optických vlastností.

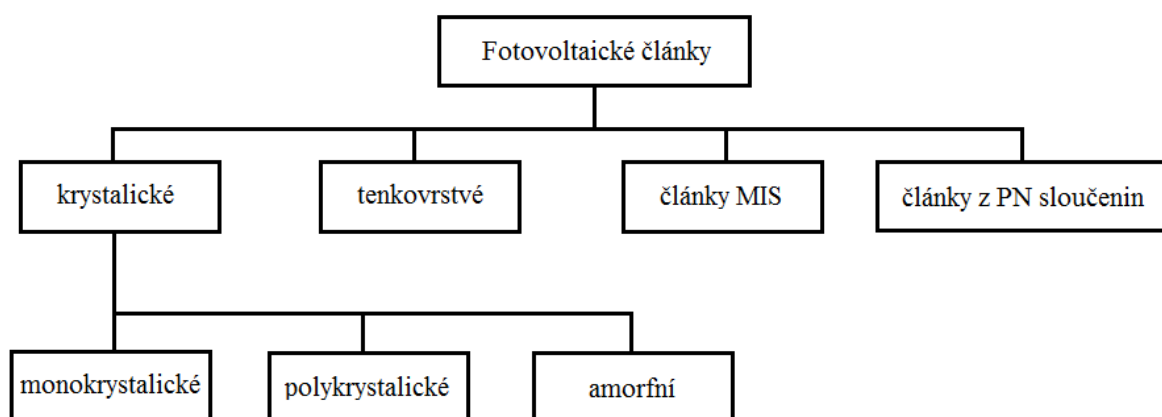
Jelikož samostatný článek má jen velmi malé využití, kvůli svému nízkému napětí a výkonu, tak se články spojují a vytvářejí fotovoltaický modul (panel). Spojením více modulů pak vzniká fotovoltaické pole, viz Obr. 2.1. [5]



Obr. 2.1 Fotovoltaický panel [5]

2.1 Typy solárních článků

Během posledních 50 let prošly fotovoltaické články postupným vývojem a zdokonalováním. Od používání FV panelů v kosmických aplikacích až po praktické využití výroby elektrické energie z energie sluneční. Během tohoto vývoje bylo použito rozličné množství různých konstrukcí a materiálů. Proto se velice často kvůli lepší přehlednosti rozdělují. Jedno z možných dělení je na Obr. 2.2. Toto je dělení z hlediska výroby. Dalším dělením, je dělení do generací. Těmi se budou zabývat další podkapitoly.[6]



Obr. 2.2 Dělení FV článků podle výroby

2.1.1 První generace (wafer based)

Do této kategorie spadají fotovoltaické články vyrobené řezáním křemíkových ingotů. Patří mezi ně články z monokrystalického křemíku, tzn. z vysoce čistého materiálu, který je běžný v mikroelektronických aplikacích a články z polykrystalického křemíku. V současné době jsou články z monokrystalického křemíku stále nejpoužívanějším typem, i z důvodu dobré účinnosti a dlouhodobé stability výkonu. Jejich nevýhodou je to, že při výrobě dochází k velké spotřebě velmi čistého a drahého, křemíku. Polykrystalické články mají nepatrně nižší účinnost, avšak dokážou lépe přeměňovat difusní světlo a světlo přicházející z boku. Monokrystalický a polykrystalický článek můžeme vidět na Obr. 2.3. Monokrystalický článek má seříznuté hrany (dáno výrobou) a u polykrystalického jsou vidět přechody mezi krystaly. [2,6,8]



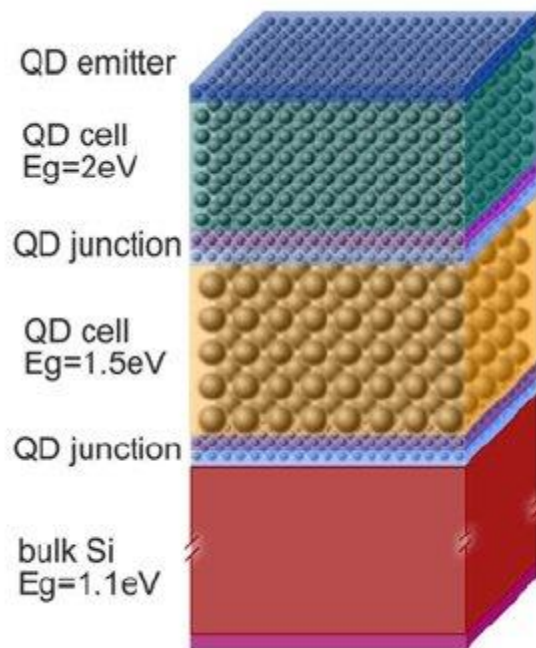
Obr. 2.3 Zleva monokrystalický a polykrystalický článek [8]

2.1.2 Druhá generace (thin film)

V této kategorii se nachází články vyrobené z mikrokrystalického a amorfního křemíku. Druhá generace se vyznačuje tím, že je zde všeobecná snaha zmenšit objem použitého křemíku, takže se vytváří tenkovrstvé články. Nevýhodou takto vyrobených článků je, že mají menší účinnost a menší stabilitu, která se vyznačuje tím, že s rostoucím časem účinnost dále klesá. Dále se začínají používat i jiné materiály než jen křemík. Jejich výhodou je jejich ohebnost a pružnost, což rozšiřuje jejich možnost použití. Například se dají vyrobit fotovoltaické folie, které se použijí jako izolace plochých střech. Tyto folie pak plní jak izolační funkci, tak i vyrábí elektřinu. V neposlední řadě se tyto materiály dají použít jako součást oblečení pro dobíjení přenosných elektronických zařízení. [2,6,7]

2.1.3 Třetí generace

Tato generace je považována spíše jako plán do budoucího výzkumu. Zabývá se zejména překročením Shockley-Quieserovy hranice omezující účinnost fotovoltaických systému. Tato hranice je účinnost kolem 32 %. Předpoklad tohoto omezení je, že jeden foton vytváří jeden využitelný exciton, který má energii rovnou šířce zakázaného pásu a přebytečné energii, mění se na teplo. Do této generace pak patří systémy, které využívají k separaci náboje jiné metody než je P-N přechod a většinou i jiné materiály než jen polovodiče, jako například fotoelektrochemické články, polymerní články, nanostruktury ve formě uhlíkových nanotrubiček nebo kvantových teček nanosených na vhodnou podložku. Výhodou těchto struktur je možnost cíleně ovlivňovat (vyladit) optické a elektrické vlastnosti. Nevýhodou je pak nízká účinnost, menší stabilita výkonu a životnost. Proto se v praxi téměř nevyužívají s výjimkou organických polymerů. Výhodou těchto organických polymerů je, že náklady na výrobu se radikálně snižují. Nevýhodou je pak nízká účinnost (2 a v laboratorních podmínkách 4 %). Plány do budoucna jsou takové, že se bude rozšiřovat využití Tandemových článků (Obr. 2.4), což v praxi znamená, že se použije více vrstev a ty pak budou moci lépe využít celé světelné spektrum. [1,2,6,7]



Obr. 2.4 Schéma tandemového článku [7]

2.2 Výroba solárních článků

- *Monokrystalické články*

Nejstarším typem článků jsou monokrystalické články. Ty se vyrábějí z ingotů polykrystalického křemíku nejčastěji Czochralského metodou. Ingoty monokrystalického křemíku dosahují až 30 cm v průměru a přes 1 m délky. Jsou zobrazeny na Obr. 2.5. Tyče se řežou na plátky silné 0,3 až 0,1 mm, které se následně lapují, což je úprava drsnosti materiálu především leštěním a broušením. Tato úprava taktéž zajistí, že jsou z plátek odstraněny nečistoty a nepravidelnosti. Jelikož jsou ingoty kulaté, tak se plátky následně seřezávají, což vytváří výsledný tvar (dnes jsou obvyklé rozměry 156 x 156 mm). Surové plátky polovodiče typu P se dotují bórem. Pak se plátek vloží do elektricky vyhřívané křemenné trubky a při teplotě 800 °C difunduje fosfor z nosného plynu do povrchové vrstvy plátek (dotace N). Poté se plátky skládají na sebe a stlačí do kompaktní kostky, která se v kyslíkové plazmě odleptá. Z hran jednotlivých destiček se tak odstraní vrstva polovodiče N.



Obr. 2.5 Monokrystalické ingoty [9]

Teoretická účinnost těchto článků je 24 %, ale technologicky možné je dosažení 14 až 16 %. Jejich energetická návratnost (EPT - Energy Payback Time), což je doba, za kterou vyprodukují energii spotřebovanou při jejich výrobě, je cca 2,7 let. [2,6,9]

- ***Polykrystalické články***

Polykrystalické články se vyrábějí odléváním čistého křemíku do forem a následným nařezáním na plátky. Formy bývají čtvercového průřezu, díky kterému využijeme více materiálu, a nevzniká tolik odpadu. Články však mívají menší účinnost než monokrystalické, protože je v místech styku jednotlivých krystalických zrn větší odpor. Avšak tento nedostatek vynahrazuje nižší cena a větší rozměry výsledných článků. Polykrystalické články jsou snadno rozpoznatelné vzhledem. Hranice krystalů připomínají zamrzlé okno. Obvyklá účinnost je 13 – 16 %, v laboratořích pak až 20 %. EPT je 2,2 roku. [2,6,8]

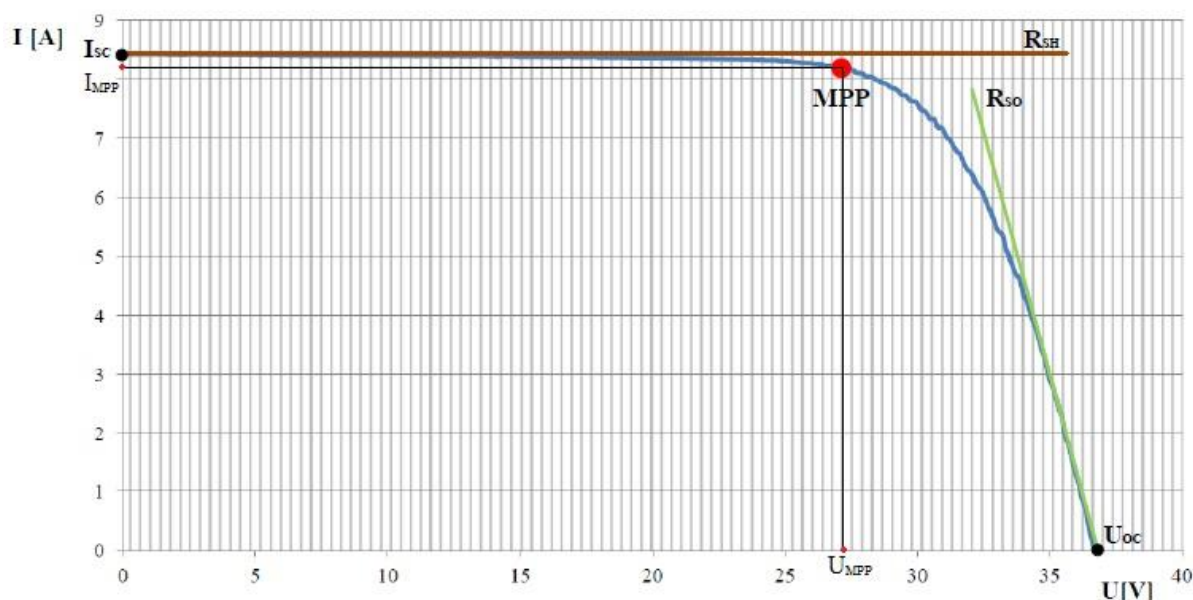
- ***Amorfni články***

Výhoda amorfni článků je taková, že jsou výrazně levnější při velkosériové výrobě, než předchozí dva typy. Vyrábí se tak, že se ve vodíkové komoře sloučenina nanese napařením na skleněnou, plastovou či kovovou tabuli při teplotě kolem 200 °C. Nanesená vrstva má poté tloušťku nepřesahující 0,001 mm. Díky nanášení tenké vrstvy dochází k velké úspoře materiálu. Nanesená vrstva nemá pravidelnou strukturu jako krystalický křemík a také je na ní větší výskyt vad. Dochází v ní k rekombinaci nábojů, což snižuje účinnost článku. Přítomnost vodíku oxidací vzdušným kyslíkem způsobuje nestabilitu. Amorfni články mají naopak i několik výhod. Mají příznivý teplotní koeficient, což ve výsledku znamená, že v letních měsících při vyšší teplotě nedochází tolik ke snížení účinnosti jako u mono či

polykrystalických článků. Stejně tak nedochází k takovému poklesu účinnosti při zastínění části článku z důvodu uspořádání velmi úzkých a dlouhých článků. Obvyklá účinnost je mezi 5 a 7 %. V laboratořích je pak dosahována až účinnost 12%. [6,11]

2.3 Parametry panelů

Pro popis a porovnávání fotovoltaických panelů využíváme voltampérové charakteristiky. V-A charakteristika popisuje grafickou závislost proudu na napětí. Lze z ní také vyčíst základní veličiny panelu viz Obr. 2.6. [12]



Obr. 2.6: V-A charakteristika s vyznačenými základními veličinami [12]

- **Proud nakrátko**

Proud nakrátko, neboli zkratový proud I_{sc} je proud při nulovém napětí. Je roven proudu generovanému světlem $I_{sc} = I_L$, pokud je odpor R_{so} také nulový. Velikost zkratového proudu I_{sc} je v řádech jednotek ampér a je závislý na intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti, teplotě a ploše panelů. [12]

- **Napětí naprázdno**

Napětí naprázdno U_{oc} je maximální napětí na svorkách fotovoltaického panelu bez připojené zátěže a tedy i při nulovém proudu. Pohybuje se v rozmezí desítek voltů.[12]

- **Pracovní bod**

Pracovní bod se udává V-A charakteristikou, na které fotovoltaický panel pracuje. Jeho poloha je závislá na rysech spotřebiče. Měla by být shodná s max. výkonem MPP (Maximum Power Point). Pokud je pracovní bod shodný s bodem zkratového proudu nebo napětí naprázdno, panel negeneruje žádný výkon. Tento bod je velice závislý na teplotě. Pokud na panel svítí světlo o velké intenzitě nebo je teplota okolního vzduchu vysoká, panel se výrazně otepluje (až na 80 °C), v důsledku čehož se mění jeho elektrické vlastnosti – sníží se svorkové napětí. Díky snížení svorkového napětí se sníží i výkon dodávaný do zátěže. Při tomto poklesu může dojít až k 70% ztrátě výroby panelu. Pro kompenzaci se používá optimalizační zařízení, které řídí přizpůsobivost odporu zátěže. [12]

- **Maximální výkon**

P_{MPP} je výkon, který je schopen panel dodávat. Maximální výkon je v ohybu V-A charakteristiky v bodě MPP a je dán vztahem (2.1)

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad (2.1)$$

I_{MPP} je proud v bodě maximálního výkonu panelu a U_{MPP} je napětí v bodě maximálního výkonu panelu. Sledovač maximálního výkonu panelu se snaží přizpůsobit parametry zátěže, aby mohl článek neustále dodávat co nejvyšší výkon. [12]

- **Faktor plnění**

Faktor plnění FF (neboli Fill Factor) je poměr mezi maximálním výkonem P_{MPP} a výkonem, který vytvoří zkratový proud a napětí naprázdno. Fill Factor závisí na odporu aktivní polovodivé vrstvy, morfologii materiálu a kvalitě kontaktů. Čím je hodnota FF vyšší, tím větší výkon je možno dodat panelem do zátěže. U mono- a polykrystalických panelů se obvykle pohybuje mezi 70 až 85 %. U amorfních je to nižší, přibližně 60 %. [12]

Faktor plnění je dán vztahem (2.2)

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.2)$$

- **Účinnost fotovoltaického panelu**

Účinnost je dána vlastnostmi materiálu, ze kterých jsou články a panel vyroben. Materiál totiž ovlivňuje spektrální citlivost, což rozhoduje jaká vlnová délka světla je v panelu využívána s největší účinností. Účinnost lze definovat vztahem (2.3)

$$\mu = \frac{P_{MPP}}{P_{rad}} = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A_C}, \quad (2.3)$$

kde P_{rad} je výkon dopadajícího záření, E je intenzita osvětlení při standardizovaných zkušebních podmínkách a A_C je plocha fotovoltaického článku. [12]

- **Vnitřní odpor**

Na vnitřním odporu R_m dochází k nežádoucím úbytkům napětí. Je dán poměrem (2.4) U_m ku I_m , což je napětí a proud při kterých článek dodává maximální výkon. [12]

$$R_m = \frac{U_m}{I_m}. \quad (2.4)$$

- **Sériový a paralelní odpor**

Tyto dva odpory udávají kvalitu fotovoltaického článku. Čím větší je hodnota sériového odporu, tím větší bude i úbytek napětí na něm. O tento úbytek bude následně menší svorkové napětí. Velikost závisí na odporu substrátu, vrstev, přechodů a kontaktů. Naopak pokud bude paralelní odpor nízký, značí to vadný článek, který se chová jako by byl uvnitř zkratován. To může být způsobeno defekty krystalické mřížky nebo svodovým proudem okolo okrajů článku. [12]

3 Defekty fotovoltaických článků a panelů

Poruchy u fotovoltaiky určujeme podle odchylky od vymezeného intervalu požadovaných vlastností. Porucha neznamená zákonitě definitivní nefunkčnost. Jestliže chceme zjistit, že zařízení pracuje správně, musíme znát určitou vlastnost, podle které pak zařízení srovnáváme. Z tohoto porovnávání zjistíme, jestli je zařízení v námi zvolených mezích tolerance. Poruchy solárních článků rozdělujeme do dvou částí – materiálové a procesní defekty.[13]

3.1 Defekty solárních článků

- **Materiálové defekty**

Tyto defekty vznikají již při výrobě křemíku, který se používá při výrobě solárních článků. Nejrozšířenějším materiálovým defektem je defekt vírový, který vzniká při injekci příměsí do křemíku. Při tomto defektu vznikají oblasti soustředných kružnic, které následně generují nižší fotoelektrický proud.[13]

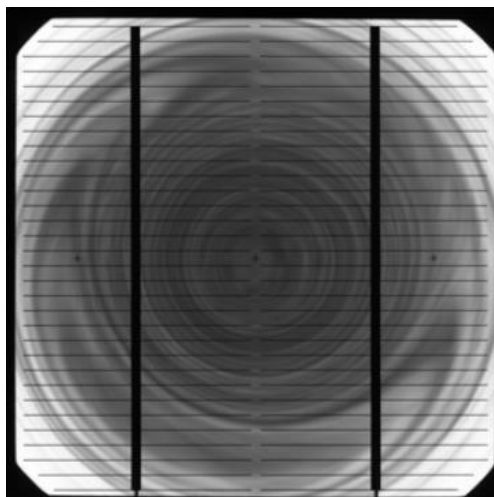
- **Procesní defekty**

Základními procesními defekty uvažujeme mechanické poškození (okrajové odštípnutí, neobroušené hrany, poškrábání povrchu solárního článku) a nehomogenitu difúzní vrstvy. Tyto defekty vznikají při zpracovávání křemíku na solární článek.[13]

3.1.1 Popis defektů solárních článků

- **Vírové defekty**

Vírové defekty vznikají při výrobě monokrystalického křemíku, při injekci příměsí. Vznikají již při Czochralského metodě, tedy tažení křemíku z kelímku. Při tomto defektu je znehodnocen veškerý materiál (Viz Obr. 3.1). [13]



Obr. 3.1 Vírový defekt [13]

- **Mechanické poškození**

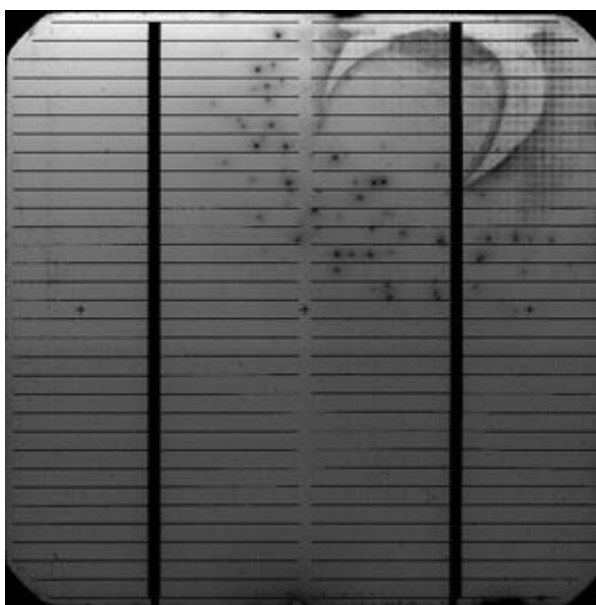
Mechanické poškození vzniká neopatrnou manipulací se solárním článkem. Dochází k němu například při kompletaci solárního panelu, při ořezávání článku nebo při zasouvání jednotlivých článků do zásobníku. Nejčastěji se poškození prezentuje usazením nečistot na povrchu článku, v důsledku čehož může být článek poškrábán. Díky poškrábání může dojít k deformaci P-N přechodu (Viz Obr. 3.2). [13]



Obr. 3.2 Poškrábaný článek [13]

- **Nehomogenita difúzní vrstvy**

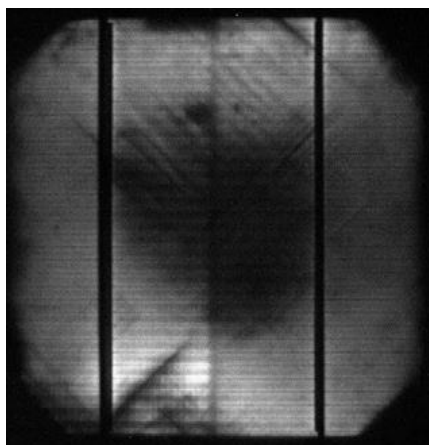
Jak název napovídá, tento defekt vzniká při výrobním procesu v průběhu difuze, kdy se vytváří vrstva polovodiče typu N. Samotnou nehomogenitu má za následek současné přidání nečistot z dotované látky (Viz Obr. 3.3). [13]



Obr. 3.3 Nehomogenita difúzní vrstvy [13]

- **Vnitřní pnutí**

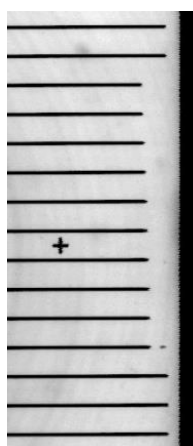
K vnitřnímu pnutí dochází, pokud se technologický postup výroby křemíku uspěchá. Pokud proces není dostatečně pomalý, dochází ke špatnému chlazení a v důsledku toho se článek může deformovat a následně dochází k praskání i při malém tepelném zatížení. (Viz obr. 3.4). [13]



Obr. 3.4 Vnitřní pnutí [13]

- **Chyby metalizace**

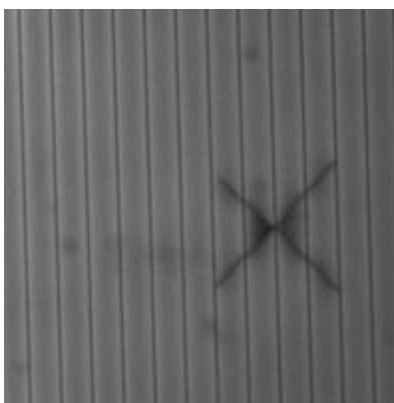
Pokud se vrchní metalizace špatně nanese na článek, nastane defekt, při kterém dochází ke špatnému odvodu proudu ze solárního článku. Špatné nanášení je způsobeno nedotažením síťotisku (Viz Obr. 3.5). [13]



Obr. 3.5 Detail chyby přední metalizace [13]

- **Skrytý lom**

Další z možných závad solárních článků je prasklina, která nemusí být na první pohled viditelná. Vzniká působením tlaku na článek. V nejhorším případě může dojít až k úplnému odlomení části solárního článku (Viz Obr. 3.6). [13]



Obr. 3.6 Skrytý lom [13]

- **Prachové částice**

Jestliže při výrobním procesu dostane do styku s materiálem množství prachu, může dojít k jeho difuzi a zatavení do solárního článku. Tyto nečistoty poté snižují účinnost jednotlivých článků. (Viz Obr. 3.7). [13]



Obr. 3.7 Prachové částice zatavené v článku [13]

3.1.2 Degradace solárních článků dopadajícím zářením

Světelná degradace, neboli Light induced degradation (LID), negativně ovlivňuje dobu života minoritních nosičů náboje. Degradace způsobená světlem se projevuje pouze u článků typu P dopovaných borem, a to jak v monokrystalických, tak i polykrystalických. V těchto článcích rozlišujeme dva mechanismy degradace. Naopak v článcích typu N, které jsou dopované fosforem či arsenem, se degradace ani v případě vyššího obsahu kyslíku v materiálu neprojevuje. [15,16]

- **Disociace párů bór – železo**

Prvním mechanismem degradace je kontaminace materiálu železem. V křemíkovém polovodiči typu P vytváří intersticiální železo (Fe_i) páry se substitučním bórem (B_s). Vzniká Fe_iB_s a při působení světla probíhá rekombinační proces, při kterém železo s bórem disociují. Pokud je fotovoltaický článek nechán při pokojové teplotě a bez osvětlení dochází k reformaci párů na typickou velikost rezistivity, což je $1 \Omega\text{cm}$. Doba života nosičů v křemíku, dopovaným bórem a kontaminovaným železem, je určena právě železem, páry Fe_iB_s nebo kombinací obou a je závislá na historii vzorku. [15,16]

Pokud fotovoltaický článek vložíme do tmavého prostředí při pokojové teplotě, tak se záporně nabitě částice železa setkávají s kladně nabitými částicemi bóru, a opět dochází k vzniku páru Fe_iB_s . to tedy značí, že původní účinnost a doba života nosičů náboje je při teplotě pod $100 \text{ }^\circ\text{C}$ po určité době uložení v temnu obnovena. [15,16]

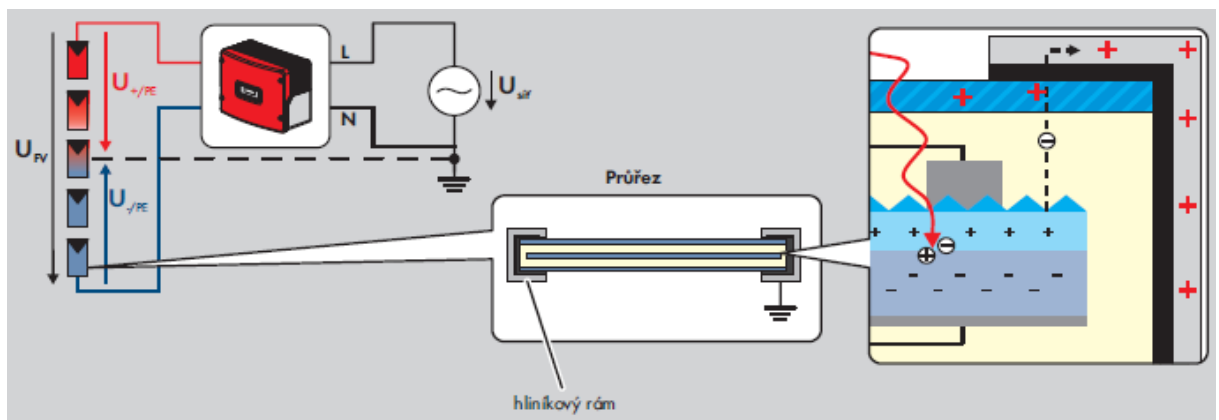
- **Formování rekombinačně aktivních komplexů bór – kyslík**

Tato degradace může probíhat i ve velice čistém křemíku, který není kontaminovaný železem, ale je vyroben Czochralského metodou. Způsobuje jí kyslík, pokud je jeho koncentrace v materiálu vyšší než $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Koncentrace bór – kyslíkových defektů je lineárně závislá na koncentraci substitučního bóru a kvadraticky na koncentraci intersticiálního kyslíku. Po vystavení světelnému záření klesá účinnost článku, dokud není dosaženo stabilního stavu. Pokles účinnosti je v řádu jednotek procent. Stejně tak i doba života nosičů náboje má stejný pokles až do ustáleného stavu. Obnovení původních parametrů článku se pak provádí při zahřátí článku nad $200 \text{ }^\circ\text{C}$ na 10 až 15 minut. Zahřívání musí probíhat za tmy, protože při zahřívání za světla probíhá degradace i regenerace článku současně a k obnovení původních vlastností tedy nemusí dojít. Tento proces může dokonce zvýšit parametry nad původní hodnotu. Pokud ponecháme solární článek ve tmě bez zahřívání jako je tomu u článků s příměsí železa, nedochází k žádným účinkům. [15,16]

3.2 Defekty fotovoltaických panelů

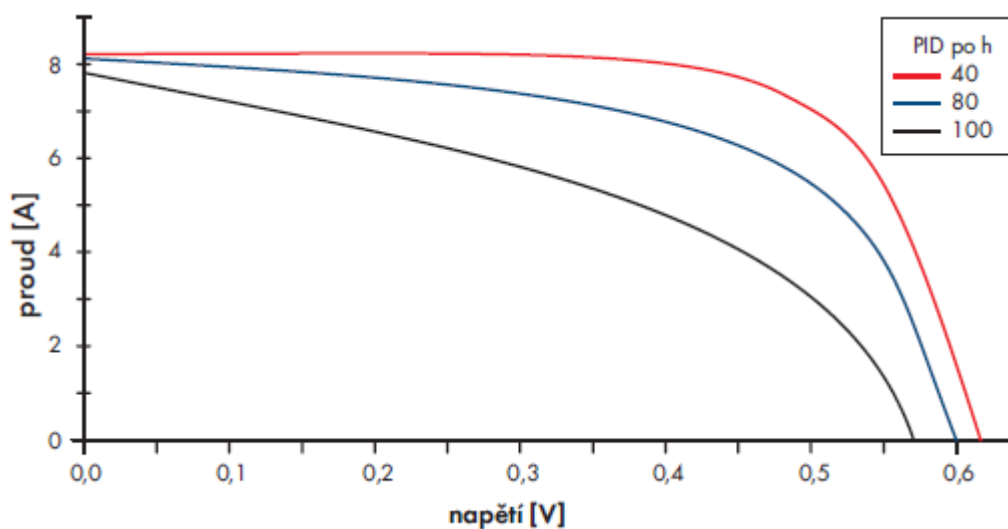
3.2.1 PID – Potenciální indukovaná degradace

Tento jev se vyskytuje, pokud je fotovoltaický panel vystaven vzájemnému působení negativního napětí mezi články a zemí. Toto napětí závisí na délce stringu a typu použitého střídače. Obvyklá hodnota potenciálu napětí je -200 nebo -350 V. Rám panelů musí být uzemněn, takže má potenciál 0 V. V důsledku tohoto rozdílu mezi články a rámem může dojít k uvolnění elektronů z materiálů použitých v panelu, které migrují do elektrického pole a poté dochází k jejich vybití přes uzemněný rám. Můžeme to vidět na Obr. 3.8. [16]



Obr. 3.8 Ukládání el. Nábojů v důsledku ztrátového proudu mezi článkem a rámem [14]

Elektrický náboj se v důsledku toho polarizuje, což ovlivňuje výkonovou křivku fotovoltaického panelu. Na Obr. 3.9 vidíme změnu charakteristické křivky během působení PID. Napětí naprázdno a zkratový proud zůstávají téměř stejné, ale je viditelné zploštění křivky, což značí zmenšení maximálního výkonu. Potenciální indukovaná degradace pak působí při přeměně světla na energii tak, že jsou volné elektrony vytrženy a přes nulový potenciál uzemněny. Dále může být PID urychleno vysokou teplotou, vlhkostí a vysokým napětím systému. [14]

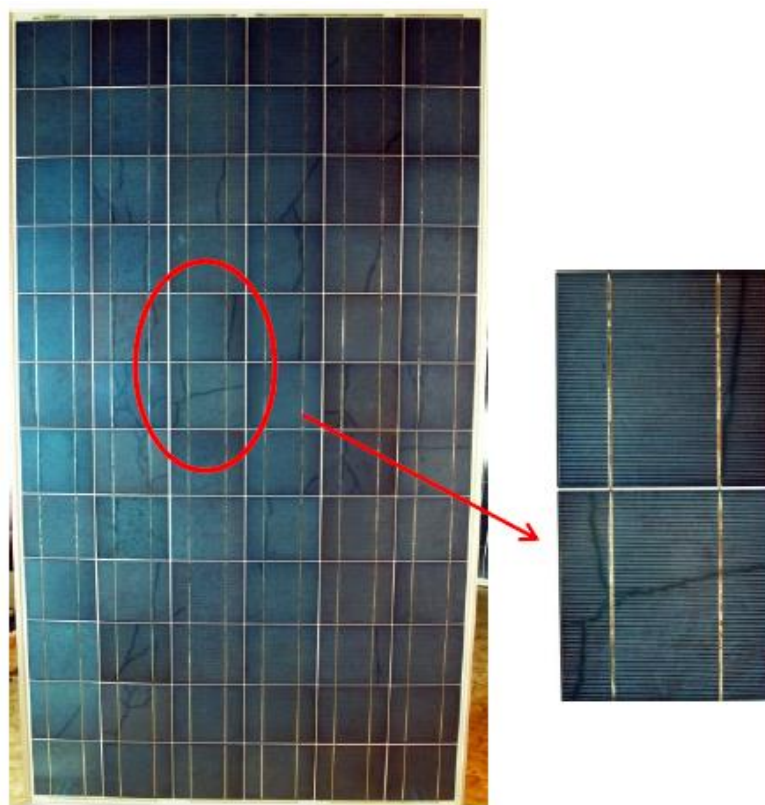


Obr. 3.9 V-A charakteristika během PID [14]

3.2.2 Šnečí cestičky

V letech 2009 - 2011 se v Česku na některých fotovoltaických panelech začal objevovat jev, nazývaný se Snail trails, neboli šnečí cestičky. Tímto jevem se začali odborníci zabývat v roce 2004 a v roce 2006 byl podrobněji zkoumaný a dokumentovaný. [17]

Šnečí cestičky (na Obr. 3.10) se vyznačují změnou zbarvení na fotovoltaických panelech ve tvaru rovných, ale i různě zahnutých zakřivení pod krycím sklem a laminační vrstvou. Tyto cestičky bývají 0,5 až 1 cm široké a jejich možné větvení je nepravidelné. Tyto cestičky jsou ohraničeny jednotlivými články. Moduly nejsou postiženy rovnoměrně a obvykle jimi bývá postiženo více článků v modulu. K tomuto jevu dochází u monokrystalických, i u polykrystalických panelů různých výrobců. [17]



Obr. 3.10 Zobrazení šnečích cestiček a jejich detail [18]

Z uvedených charakteristik tedy plyne, že tento jev souvisí se samotnými články v panelu (ohraničení hranicemi článků, postižení pouze několika článků v panelu). Jev se objevuje až po několika měsících provozu, z čehož plyne, že se jedná o kombinaci chemických a fyzikálních změn a jev je závislý na použité technologii či komponentech. To vyplývá z toho, že se cestičky vyskytují pouze na některých značkách výrobců panelů. [17]

Výklad vzniku těchto cestiček zatím není jednoznačný. Zabývá se jím však výzkum vědců z Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics. Nejčastější hypotézou je, že šnečí cestičky vznikají kombinací několika vlivů. Těmi jsou:

- Mikrotrhliny ve fotovoltaických článcích.
- Použitá ethylvinylacetátová (EVA) fólie jako podkladová vrstva spodní strany článků.
- Specifické chemické komponenty použité při výrobě této fólie.
- Pronikání vlhkosti do struktury fotovoltaického panelu.
- Fyzikální a chemické vlivy, které probíhají při působení slunečního záření a teplot ve venkovním prostředí.

Nejpokročilejší hypotézy Fraunhoferova Centra tvrdí, že tyto cestičky vznikají difuzí některých chemických částí EVA fólie přes mikrotrhliny v článcích na jeho lícovou stranu, na níž dochází k reakci se stříbrnými kontakty, a ty následně oxidují. Případně polymery z EVA fólie depozitují na lícové straně článku a vytvářejí změnu zabarvení. [17]

Společnosti Canadian Solar a Schüco International však tvrdí jiné příčiny vzniku. První jmenovaná se přiklání k reakci chemických komponent použitých při výrobě EVA fólií a druhá podporuje teorii, že vznik mají za následek změny v elektrickém odporu a díky tomu i rozložení proudu a teplot na mikrotrhlinách. [17]

Mikrotrhliny ve fotovoltaických článcích, které s největší pravděpodobností způsobují vznik šnečích cestiček, mohou vznikat již při výrobě samotného panelu od fáze výroby ingotu až po sestavení samotného panelu. K detekci se při výstupní kontrole využívají elektroluminescenční metody detekce mechanických vad článků. Tato metoda zajišťuje, že panely, které vyjdou z výroby, by měly být bez mikrotrhlin. [17]

Mikrotrhliny však nevznikají pouze při výrobě. Vznikají také při dopravě a nesprávné manipulaci, což je při nárazech, nešetrné manipulaci s paletami vysokozdvíhacími vozíky, nošení panelů na hlavě, stoupaní na sklo panelů nebo při nárazech konektorů na zadní stranu laminátu. Dále také vznikají vlivem počasí, ať už to je při zatížení sněhem, prudkými změnami teplot, a také při krupobití. [17,18]

Ze zkoumání vyšlo najevo, že Šnečí cestičky jsou pouze estetický problém. Nicméně mikrotrhliny mohou způsobovat snížení výkonu, či poškození panelu. Proto po nalezení cestiček je vhodné panely přezkoumat, jestli mají správnou funkčnost. [17,18]

3.2.3 Delaminace

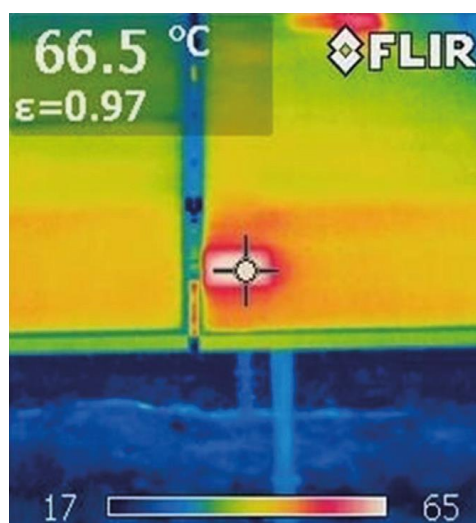
Delaminace panelu znamená, že se od sebe separují jednotlivé části panelu. Bývají to EVA fólie od fotovoltaického článku a tvrzeného skla. V důsledku toho vznikají dutiny mezi jednotlivými vrstvami panelu. Při tomto defektu je volná dutina zaplněna vodou a ta svými korozivními účinky s chloridy způsobí, že se poruší správná funkčnost celého fotovoltaického panelu. [19]



Obr. 3.11 Delaminace

3.2.4 Horká místa

Horká místa (na Obr. 3.12), neboli hot spots je velmi častým defektem, který vzniká v krystalické mřížce fotovoltaických článků. Tyto místa, ve kterých se vyskytuje nadměrné množství tepla, se nazývají mikro- nebo microcracks. Jestliže je rozdíl teplot těchto míst a okolních článků větší než 50 °C, může dojít i k destrukci článku, a tím celého panelu. Pro zjištění teplých míst je využíváno několika postupů. Nejjednoduššími metodami je vizuální kontrola zadního Tedlaru fotovoltaického panelu nebo jednoduše pohmatem rukou. Náročnější metody jsou pak měření termovizní kamerou nebo laboratorní metodou, tzv. elektroluminescenční metodou ELCD. ELCD metoda spočívá v tom, že je panel po tmě napájen z pomocného zdroje v předním směru při přibližně 50% výkonu P_p . Při takovýchto podmínkách se v místech krystalických poruch objevuje luminiscenční jev, který se detekuje speciální infrakamerou. [19]



Obr. 3.12 Horké místo vyfocené termokamerou [19]

3.2.5 Zastínění

Největší vliv, na generovaný výkon fotovoltaickou elektrárnou má intenzita slunečního záření. Zvláště u větších instalací je časté nerovnoměrné rozložení intenzity dopadajícího slunečního záření. Jedna část může být více osvětlena než druhá. V běžné praxi tedy není reálné dosáhnout stejné velikosti intenzity slunečního záření na celé aktivní ploše. Oblačnost, nečistoty na panelech nebo stín tak vytváří značné nerovnoměrnosti v osvětlení panelů.

Pokud je nějaký článek zastíněn, jako tomu je na Obr. 3.13, mění se jeho polarita a stává se spotřebičem. V důsledku toho se buňka začne přehřívat. Takovéto zvýšení teploty poté snižuje jak životnost, tak výkon panelu. Proud ve stringu ve kterém je takovýto zastíněný článek je pak roven proudu právě zastíněného článku. Vliv velikosti stínu na výkon fotovoltaického panelu je v tabulce 3.1 [19]



Obr. 3.13 Stín způsobený okolní vegetací a plotem [19]

Velikost stínění na článcích	Výkon FV panelu [W]
Bez stínění	100
1/4 článku	82
1/2 článku	63
Celý článek	62
1 svislá řada	60
1 vodorovná řada	23
2 vodorovné řady	18

Tabulka 3.1 Vliv zastínění na výkon [21]

3.2.6 Proražení/vyhoření bypassové diody

Bypassové diody mají velký význam, pokud je část fotovoltaického panelu zastíněna. Články jsou totiž zapojeny sériově, proto jimi musí protékat stejný proud. Zastíněný článek se přestává chovat jako zdroj elektrické energie a začne spotřebovávat energii, kterou vyprodukovaly ostatní nezastíněné články. Tato ztrátová energie způsobí, že se nezastíněný článek začne přehřívat a v důsledku toho může dojít ke zničení. Kvůli možnému stínění se zařazují paralelně tzv. bypass diody, které umožní větší průchod proudem, než je proud zkratový zastíněných článků. Poruchy bypass diod, například proražení zobrazené na Obr. 3.14, jsou pak způsobeny nevhodným dimenzováním na zkratový proud, který způsobí nadměrné oteplení a následnou destrukci diody. [19]



Obr. 3.14 Proražení bypassové diody [18]

3.2.7 Kabeláž

U stejnosměrné kabeláže je nejčastější vadou špatné dimenzování průřezu vzhledem k její délce. Další možným problémem je, pokud jsou kabely nevhodně přichyceny ke konstrukci panelů. U volně visících kabelů je možné, že je ve spojovacím konektoru rozpojí, nebo dokonce roztrhne pasoucí se zvěř (Obr. 3.15). Stejnosměrný pojistkový odpínač může být zničen nedbalým dotažením šroubového spoje. Důležitá je také odolnost stahovacích pásek nebo chrániček vůči UV záření. Pokud tyto komponenty nejsou odolné, tak se působením slunečního záření rozpadnou.

Podobně jako u stejnosměrné kabeláže, tak i u střídavé se musí dbát na správné dimenzování průřezu v závislosti na přenášených výkonech a ke vzdálenosti střídače od

rozvaděče nebo transformátoru. Na takto poddimenzovaných kabelech dochází k úbytkům napětí, a proto automaticky roste výstupní napětí střídače. Takto roste až do chvíle, kdy je překročen povolený rozsah výstupního napětí střídače. V tu chvíli vestavěné ochrany střídače vypnou a vznikají ekonomické ztráty. [19]



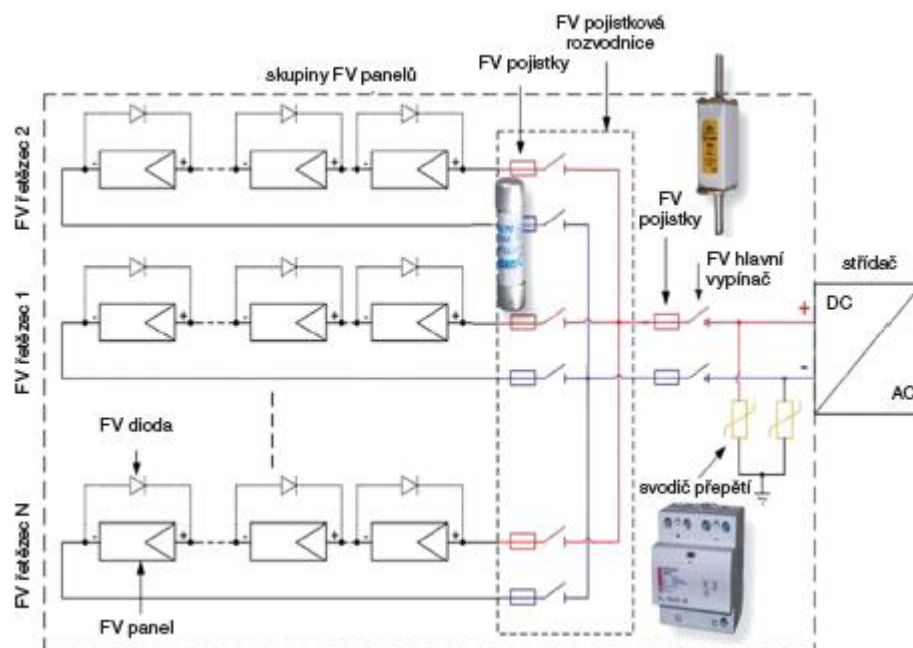
Obr. 3.15 Roztržené kabely pasoucí se zvěří [19]

3.2.8 Nevhodné jištění

Jištění fotovoltaických elektráren závisí na množství stringů. Pokud máme pouze jeden samostatný string, tak není nutné jakkoliv ho jistit, jelikož zde nejsou žádné vnější zdroje proudu, které by fotovoltaický panel mohly poškodit. Podobně tomu je, pokud jsou řazeny dva stringy paralelně. Když na jednom z nich nastane zkrat, tak se mu druhý string pokouší vnutit svůj proud. Jelikož jsou panely a kabely dimenzovány na proud větší, nehrozí žádné nebezpečí. Žádné vnější zdroje proudu zde nejsou, a proto není možnost první panel poškodit.

Pokud bude však tři a více paralelně řazených stringů za sebou (schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 3.16), je nutno je jistit. Je to z toho důvodu, že součet proudů nepoškozených stringů bude větší, než na co je panel a kabeláž dimenzována.

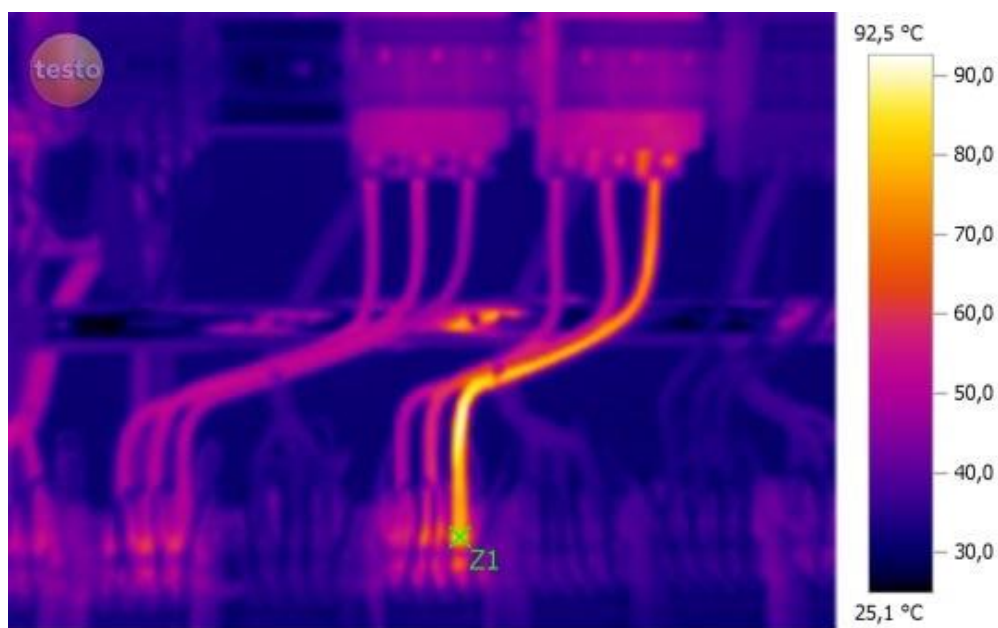
Uvažujme, že každý string může generovat maximální proud o velikosti $1,25 I_{SC}$. Panely a kabeláž musí bez poškození vydržet proud $1,56 I_{SC}$. Jak vidíme pro samostatný string a 2 paralelní stringy riziko nehrozí. Pokud budou stringy tři, protékající proud vadným panelem bude $2,5 I_{SC}$. Tento proud by mohl panel nebo kabeláž poškodit. Proto musí být do každého ze tří stringů zařazena pojistka o hodnotě $1,56 I_{SC}$. [19]



Obr. 3.16 Jištění FVE se třemi a více stringy [19]

3.2.9 Přechodové odpory

V místech přechodových odporů se zvyšuje teplota. Pokud je spoj proveden nekvalitně, vzrůstá elektrický odpor, a tak může teplota vyrůst až na kritickou hodnotu, při které takovýto přechodový odpor způsobí požár. [20]



Obr. 3.17 Nedotažený kontakt v elektrickém rozvaděči [20]

3.2.10 Vliv povětrnostních a klimatických podmínek

- **Vítr**

Působení větru může způsobit úplné zničení fotovoltaické elektrárny (Obr. 3.18). Mělo by se tedy dbát na správné ukotvení.



Obr. 3.18 FVE na rodinném domě po účincích větru [21]

- **Sníh**

Sníh může také velice snadno zničit fotovoltaické panely. Pokud nezajistíme, že má sníh kam odtávat, bude se hromadit u paty panelu a svojí hmotností může zničit jak rám, tak i samotný panel, viz. Obr. 3.19. Při instalaci se tedy musí dbát na správné podepření a konstrukci panelu.



Obr. 3.19 Promáčknutý panel a zničený rám [21]

4 Měření panelů na ZČU

4.1 Měření zastínění na FVE ZČU

Fotovoltaická elektrárna stojící na budově FEL ZČU má instalovaný výkon 20 kWp. Průměrně vytvoří elektrárna za rok 17 MWh elektrické energie. FV elektrárna byla uvedena do provozu 12. 3. 2004. Panely jsou tvořeny monokrystalickými články, jejich orientace je na jih se sklonem 45 °. FVE se skládá ze 192 panelů, kde jejich celková plocha je 163,2 m², a osmi střídači po 2,5 kW. Název panelů je I-110/24 Solar Panel. Jejich štítkové hodnoty jsou vypsány v tabulce 4.1:

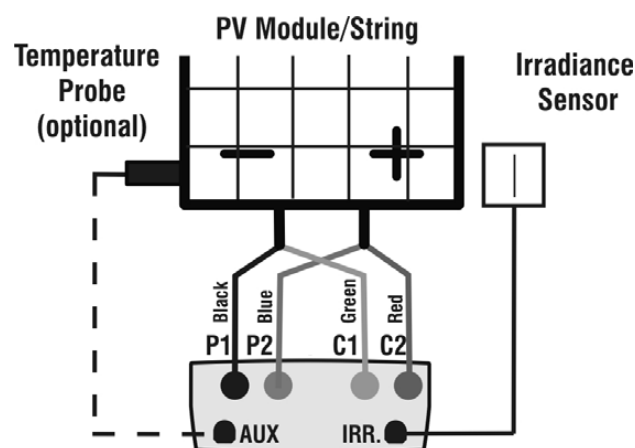
P_{MPP} (W)	110
U_{oc} (V)	43.2
I_{sc} (A)	3.38
U_{MMP} (V)	34.8
I_{MMP} (A)	3.16
Účinnost panelu	12.9%
Fill Factor	75.3%

Tabulka 4.1

Měření se provádělo analyzátozem I-V 400 vyfoceným na Obr. 4.1. Byl zapojen podle schématu na Obr. 4.2.



Obr. 4.1 Analyzátor I-V 400



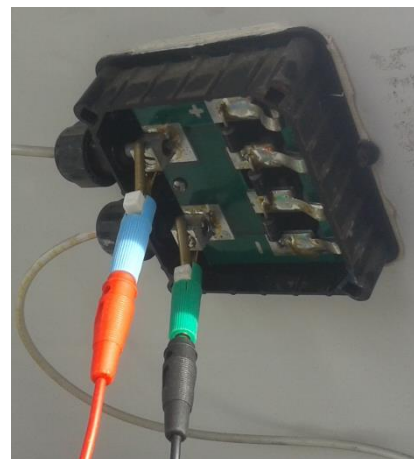
Obr. 4.2 Zapojení analyzátoru

V den měření nebyly nejideálnější podmínky. Intenzita záření se ani zdaleka nepřiblížila nejlepšímu 1000 W/m^2 , ale pohybovala se pouze kolem 500 W/m^2 .

Měření probíhalo na jednom z panelů 20 kWp FVE na ZČU vyfocené na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Fotovoltaický panel na střeše ZČU

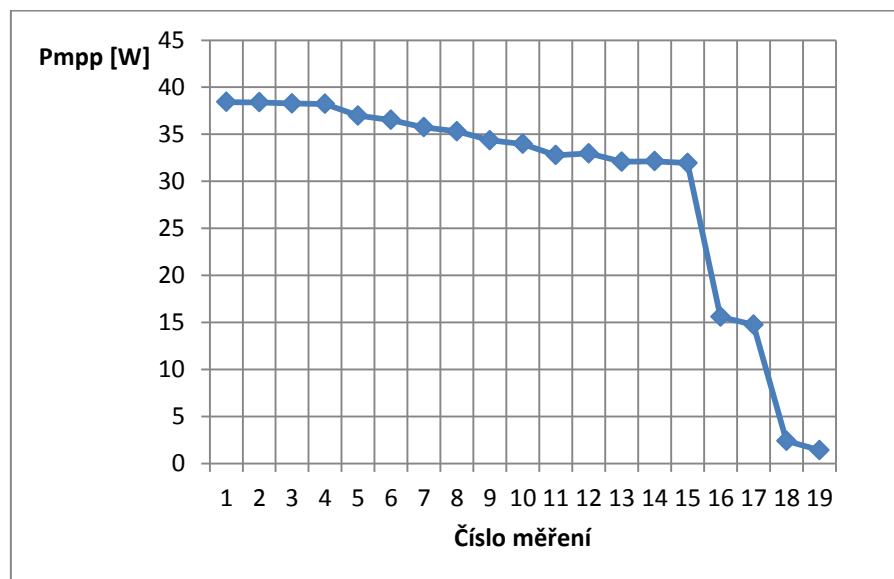


Obr. 4.3 Analyzátor připojený k panelu

Nejprve jsem panel odpojil od zbytku FVE a připojil analyzátor k elektrodám (Obr. 4.3). Poté jsem nastavil analyzátor na typ panelu I-110/24 viz Tabulka 4.1. Měřil jsem nejdříve bez zastínění, poté jsem začal stínit vodorovnou řadu. Nejprve $\frac{1}{4}$ článku, pak $\frac{1}{2}$ článku, celý článek a dál jsem přidával vždy po článku, až jsem změřil analyzátořem zastíněnou celou řadu. Následně jsem změřil po člancích řadu svislou. Stín jsem vytvářel neprůsvitnou deskou. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 4.2

Číslo měření	Pmpp[W]	Uoc [V]	Ump [V]	Imp [A]	Isc [A]	Teplota modulu [°C]	Intenzita [W/m ²]
1	38,42	39,30	19,51	1,97	2,21	26,70	542
2	38,39	39,25	19,51	1,97	2,20	26,70	539
3	38,27	39,21	19,44	1,97	2,19	26,90	535
4	38,22	39,19	19,44	1,97	2,18	27,10	531
5	36,98	38,96	19,44	1,90	2,13	27,10	531
6	36,51	38,94	19,80	1,84	2,08	27,20	528
7	35,74	38,90	19,44	1,84	2,05	27,30	525
8	35,31	38,46	19,80	1,78	2,03	27,30	520
9	34,35	37,74	19,72	1,74	1,98	27,30	514
10	33,97	38,37	19,44	1,75	1,93	27,40	509
11	32,78	38,31	19,87	1,65	1,86	27,60	501
12	32,96	37,84	19,80	1,67	1,89	27,70	496
13	32,07	37,97	19,51	1,64	1,87	27,90	498
14	32,13	37,73	19,72	1,63	1,84	27,90	493
15	31,94	37,49	19,80	1,61	1,83	27,70	487
16	15,58	38,97	8,65	1,69	1,93	27,60	499
17	14,74	38,67	8,93	1,65	1,96	28,00	502
18	2,4	38,54	10,43	0,23	0,59	28,30	507
19	1,41	37,87	17,87	0,08	0,32	28,20	510

Tabulka 4.2 Naměřené hodnoty při zastínění

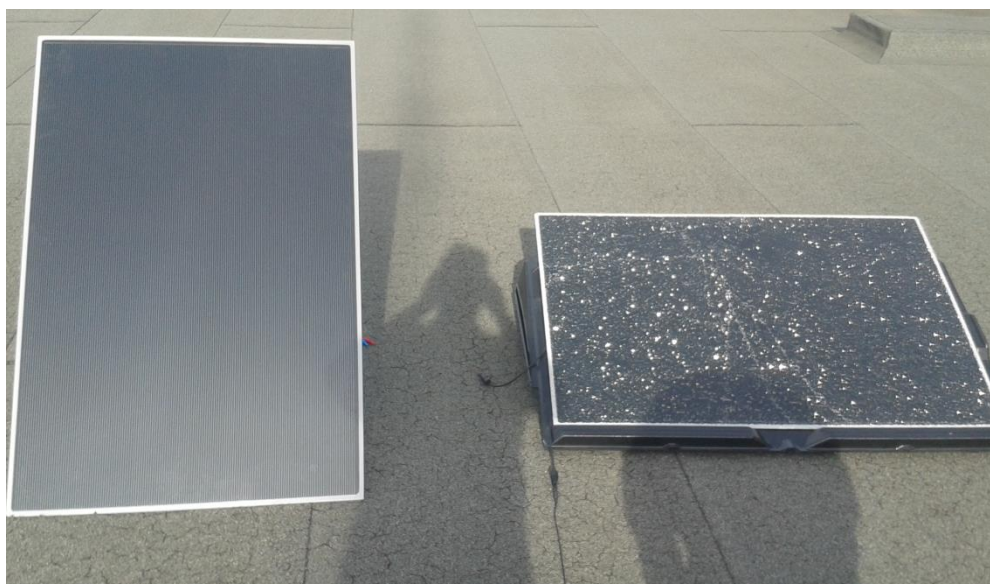


Obr. 4.4 Závislost maximálního výkonu na stínění

Jak můžeme z Obr. 4.4 vyčíst, stínění má velký vliv na celkový maximální výkon. Avšak neshoduje se tabulkou 3.1 z kapitoly 3.2.5. Do čísla měření 15 se stínily články za sebou sériově řazené. Pokles by měl být 40 %. Nicméně při mém měření měl nezastíněný panel

$P_{MPP} = 38,42 \text{ W}$ a zastíněna řada $P_{MPP} = 32,13 \text{ W}$, což je úbytek necelých 17 %. Když jsem zakryl dva paralelní články vedle sebe, P_{MPP} se snížil jen nepatrně na 31,94 W. To je dáno zařazením bypassové diody, které brání v poklesu. V dalším kroku, po zakrytí dalších dvou článků, byl však skok razantnější. Zakrytím těchto dvou článků jsem vyřadil z provozu další 2 řady. Výkon klesl na $P_{MPP} = 14,74 \text{ W}$. Tento pokles je necelých 62% z původního výkonu nezakrytého panelu. Přidáním zastínění dalších dvou článků se výkon snížil na $P_{MPP} = 1,41 \text{ W}$. To je přibližně 3,7 % původního výkonu. Díky malé intenzitě záření jsem nemohl proměřit další řadu, protože proud už byl natolik malý, že přístroj nereagoval.

4.2 Porovnání funkčního a nefunkčního panelu



Obr. 4.5 Vizuální porovnání funkčního a rozbitého panelu

Měřeny byly panely Q.Smart UF L 110 se štítkovými hodnotami, které jsou zobrazeny v následující tabulce 4.3

P_{MPP}	[W]	110
I_{SC}	[A]	1,69
U_{OC}	[V]	93,3
I_{MPP}	[A]	1,52
U_{MPP}	[V]	72,4
μ	[%]	$\geq 11,7$

Tabulka 4.3 Tabulkové hodnoty pro panel Q.Smart UF L 110

Intenzita záření při měření klesla na hodnotu 360 W/m^2 , která nemá vypovídací hodnotu a bohužel do odevzdání DP se počasí nezlepšilo. Chtěl bych proto toto měření do obhajoby zpracovat ještě jednou.

Díky malé intenzitě se nedařilo poškozený panel nijak změřit, protože výstupní proud byl příliš malý, a proto jsem chtěl oba panely zapojit do stringu a porovnat, jak se hodnoty odliší od změřeného „zdravého“ panelu.

Jak můžeme vidět v tabulce 4.4, tak se hodnoty téměř nezměnily.

	P_{MPP} [W]	U_{oc} [V]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	I_{sc} [A]	Intenzita [W/m ²]
Funkční panel	34,69	78,38	56,59	0,61	0,83	363,00
Panely zapojeny do stringu	34,27	78,28	56,45	0,61	0,82	362,00

Tabulka 4.4 Výstupní hodnoty měření panelů Q.Smart Uf L 110

Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit technické možnosti využívání solárního záření, analyzovat možné vady a poškození fotovoltaických panelů a následně provést a zhodnotit měření reálných panelů.

Na úvod jsem popsal a rozdělil fotoelektrický jev, dále popsal dělení a výrobu fotovoltaických článků. V diplomové práci jsem také rozebíral elektrické parametry, podle kterých se fotovoltaické panely hodnotí.

Nejrozsáhlejší kapitola se věnovala defektům, a to jak defektům článků, tak i defektům celých panelů. Z použité literatury jsem zjistil, že i nepatrná vada, ať už v článku nebo v celém panelu může zapříčinit fatální selhání systému.

Měření bohužel nevyšlo podle předpokladů. První měření se zabývalo vlivem zastínění na fotovoltaický panel. Bohužel intenzita slunečního záření nebyla ideální, a proto i výsledky byly značně zkreslené. Nicméně lze z nich vyvodit určitý závěr, a to, že pokud se stíní články za sebou sériově zapojené, tak to má ve výsledku mnohem menší vliv na maximální výkon, než když jsou zastíněné články, které jsou zapojené paralelně. Z mého měření vyplývá, že zastíněná sériová řada ztratí necelých 17 % svého výkonu, naproti tomu paralelní řada ztratí více než 94 %. Jak už jsem řekl, měření bylo zkreslené nedostatečným slunečním zářením, ale i tak z toho vyplývá, že stínění v paralelním zapojení má mnohem drastičtější účinky na celkový výkon panelu.

Druhé měření díky ještě více snížené intenzitě bohužel neproběhlo vůbec podle plánu a porovnání nefunkčního a funkčního panelu bylo bezvýsledné.

Do obhajoby diplomové práce bych chtěl, pokud mi to počasí dovolí, obě měření absolvovat znovu, aby výsledky byly průkaznější.

Seznam literatury

- [1] PATEL, Mukun R. TAYLOR & FRANCIS GROUP. Wind and Solar Power Systems. Secon Edition. United States of America: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-15570-0.
- [2] BROŽ, KAREL A BOŘIVOJ ŠOUREK. ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE. VYD. 1. PRAHA: VYDAVATELSTVÍ ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2802-X.
- [3] Fotovoltaický jev. ČEZ. Solární energie [online]. 2006 [cit. 2014-01-14]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>
- [4] MURTINGER, Karel; BERANOVSKÝ, Jiří; TOMEŠ, Milan. *Fotovoltaika : Energie ze slunce*. Vyd. 1. Praha : EkoWATT, 2007. 81 s. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [5] *Solární energie* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [6] CZECH SOLAR. *Technologie a vývoj PV modulů* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/technologie-a-vyvoj-panelu/>
- [7] Fotovoltaika druhé a třetí generace. FEJFAR, Antonín. *TZB info* [online]. 2006 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3506-fotovoltaika-druhe-a-treti-generace>
- [8] Techpark vydavatelstvo. *Solartechnika.sk* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/jakou-fotovoltaickou-elektrarnu-zvolit-na-dum.html>
- [9] Kverneland Group s.r.o. *Teorie fotovoltaiky* [online]. 2008 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.kvernelandgroup.cz/cz/fotovoltaika/teorie-fotovoltaiky/>
- [10] MURTINGER, KAREL, BERANOVSKÝ, JIŘÍ, TOMEŠ, MILAN. *Fotovoltaika : elektřina ze slunce*. Brno : ERA, 2008. 16 s. ISBN 978-80-7366-133-5.
- [11] Solareni. *Alternativní technologie - amorfní křemík* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.solareni.cz/slunecni-elektrarny/technicke-informace/alternativni-technologie-amorfni-kremik/>
- [12] VALA, Zbyněk. *Fotoluminiscenční metody detekce defektů solárních článků*. Brno, 2009. 65 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [13] JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008. 92 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí doktorské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

- [14] Panelová technika. In: [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: files.sma.de/dl/7418/Duennschicht-TI-UCZ114630.pdf
- [15] GHOSH, M. et. al. *Light-induced degradation of multicrystalline silicon solar cells*. In 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. Dresden, Germany 2006.
- [16] DAMIANI, Ben, HILALI, Mohamed, ROHATGI, Ajeet. *Light induced degradation in manufacturable multi-crystalline silicon solar cells*. Georgia Institute of Technology.
- [17] Fenomén „Snail Trails“ / „šnečí cestičky“ – je ohrožen výkon FVE? Zdroj: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneci-cesticky>. *TZB info* [online]. 2012 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneci-cesticky>
- [18] Bařinka, R.: Snailtrails – technický, nebo jen estetický problem?, Prezentace na 7. ČFVK, Brno, 3. Květen 2012
- [19] TOMEŠ. Milan. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011*. Ostrava, 2012. Unie soudních znalců.
- [20] Fotovoltaické moduly a instalace fotovoltaických elektráren pod kontrolou termokamer testo. KMOCH, Jaroslav. TESTO, s.r.o. *Prorevize* [online]. 2011 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.prorevize.cz/termodiagnostika/216-fotovoltaicke-moduly-a-instalace-fotovoltaickych-elektarren-pod-kontrolou-termokamer-testo>
- [21] FST ČVUT. *Fotovoltaika pro budovy* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/Prezentace/FV_prez_BaP.pdf
- [22] Západočeská univerzita v Plzni. ŠKORPIL, Jan. KEE FEL. *A přece se točí!* [online]. 2012 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.zcu.cz/u_noviny/index.html?file=/u_noviny/2012/duben/vrtul.html