

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

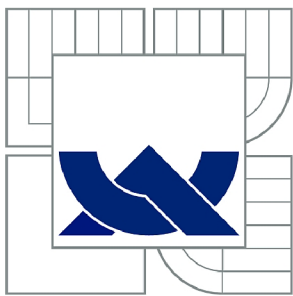
DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ FOTOVOLTAICKÝCH
PANELŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

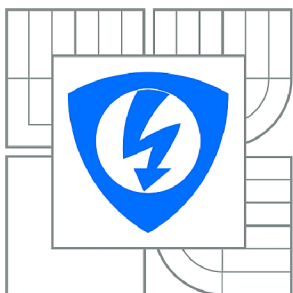
Bc. ROMAN KLADIVA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ

LONG-TERM MONITORING OF PARAMETERS OF PHOTOVOLTAIC MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ROMAN KLADIVA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROMAN GVRITISHVILI

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Roman Kladiva

ID: 119477

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy činnosti fotovoltaických článků. Zaměřte se na defekty ovlivňující elektrické vlastnosti a životnost. Seznamte se s diagnostickými metodami používanými pro fotovoltaické články a panely. Dlouhodobě sledujte vybrané fotovoltaické panely pomocí diagnostických metod. Porovnejte a vyhodnoťte naměřené výsledky s výsledky před a po činnosti v reálných podmínkách v solárním systému a po urychleném stárnutí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 30.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Roman Gvritishvili

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou vlivu degradačních mechanismů na změnu parametrů fotovoltaických panelů. Cílem práce bylo dlouhodobé sledování vybraných solárních modulů, srovnání jejich parametrů s měřeními z minulých let a vyhodnocení vlivu degradačních mechanismů na jejich vlastnosti. Teoretická část práce je zaměřena na popis sledovaných parametrů a defektů panelů, dále jsou zde rozebrány měřicí metody, kterými byly moduly monitorovány. Experimentální část se pak skládá z měření FV panelů jednotlivými testovacími metodami. Z naměřených hodnot byly následovně sestrojeny grafické závislosti a zjištěné výsledky byly porovnány s výsledky měření z minulých let. Poslední část diplomové práce je věnována zhodnocení degradace jednotlivých FV panelů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaický panel, fotovoltaický článek, degradace FV panelu, defekt FV článku, elektroluminiscence, FLASH test, PROVA.

ABSTRACT

This thesis deals with the influence of degradation mechanisms to change the parameters of photovoltaic panels. The aim of the study was the long-term monitoring of selected solar modules, comparing their parameters with measurements from previous years and the evaluation of degradation mechanisms on their properties. The theoretical part is focused on the description of the monitored parameters and defects. Panel, are discussed measuring methods by which the modules were monitored. Experimental part then consists of measuring modules individual test methods. The measured values were subsequently constructed graphical dependence, and the results were compared with measurements from previous years. The last part of the thesis is devoted to evaluation of the degradation of PV modules.

KEYWORDS

Photovoltaic panel, solar cell, solar panel degradation, defect PV cell, electroluminescence, FLASH test, PROVA

KLADIVA, Roman *Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Elektrotechnologie, 2013. 98 s. Vedoucí práce byl Ing. Roman Gvritshvili

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaických panelů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Romanu Gvritshvilimu a panu doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Aleši Veselému a společnosti Solartec s. r. o. za poskytnutí klimatické komory a možnosti provedení testů FV panelu v klimatické komoře a panu Ing. Janu Strnadelovi za zapůjčení termovizní kamery a pomoc při měření FV panelů termovizí. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	12
1 Fotovoltaika	13
1.1 Fyzikální princip funkce FV článku	13
1.2 Základní typy fotovoltaických článků	15
1.2.1 První generace	16
1.2.2 Druhá generace	16
1.2.3 Třetí generace	16
1.3 Materiály pro výrobu fotovoltaických článků	16
1.3.1 Monokrystalické křemíkové články	17
1.3.2 Polykrystalické křemíkové články	18
1.3.3 Články z amorfního křemíku	19
1.4 Fotovoltaické panely	20
1.4.1 Konstrukce FV panelů	20
1.4.2 Konstrukční řešení fotovoltaických systémů	22
2 Elektrické parametry fotovoltaických panelů	23
2.1 Parametry odečtené z V–A charakteristiky	23
2.1.1 Zkratový proud	23
2.1.2 Napětí naprázdno	23
2.1.3 Pracovní bod	24
2.1.4 Bod maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point) . . .	24
2.1.5 Maximální výkon	24
2.1.6 Fill Factor	25
2.1.7 Účinnost fotovoltaického panelu	25
2.2 Parametry ovlivňující účinnost fotovoltaického panelu	26
2.2.1 Vnitřní odpor	26
2.2.2 Reflexivita	26
2.2.3 Sériový a paralelní odpor	26
3 Defekty solárních článků a panelů	27
3.1 Defekty fotovoltaických článků	27
3.1.1 Materiálové defekty (Grow Defects)	27
3.1.2 Procesní defekty (Processing Induced Defects)	27
3.1.3 Přehled defektů	28
3.1.4 Degradace FV článků dopadajícím zářením	33
3.2 Defekty fotovoltaických panelů	34

3.2.1	Potenciální indukovaná degradace	34
3.2.2	Degradace FV panelů dopadajícím zářením	34
3.2.3	Delaminace FV panelu	35
3.2.4	Proražení/vyhoření bypassové diody	36
3.2.5	Horká místa (Hot spots)	37
3.2.6	Šnečí cestičky (Snail trails)	38
4	Diagnostické metody FV panelů	40
4.1	Venkovní metody měření	40
4.1.1	Měření V–A charakteristiky pomocí testeru PROVA 210 . . .	40
4.1.2	Termovizní diagnostika fotovoltaických panelů	42
4.2	Laboratorní metody měření	43
4.2.1	Měření FV panelů FLASH testem	43
4.2.2	Elektroluminiscence	45
4.2.3	Měření FV panelu v klimatické komoře	46
5	Praktické měření FV panelů	49
5.1	Parametry měřených panelů	50
5.1.1	Solartec STR 36–50	50
5.1.2	Rich Solar RS-M185	51
5.1.3	Microsol MM0225–G	52
5.1.4	Panel Solartec z polykrystalického křemíku	53
5.1.5	Panel z amorfního křemíku	53
5.2	Měření V–A charakteristiky pomocí analyzátoru PROVA 210	54
5.2.1	Popis metody	54
5.2.2	Naměřené výsledky	55
5.3	Měření panelů termovizní kamerou	61
5.4	Měření V–A charakteristiky pomocí FLASH testu	63
5.4.1	Popis metody	63
5.4.2	Naměřené výsledky	64
5.5	Měření pomocí elektroluminiscence	74
5.5.1	Popis metody	74
5.6	Stárnutí a degradace FV panelů	83
6	Závěr	91
	Literatura	93
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	96

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Valenční a zakázané pásy v polovodiči	14
1.2	Princip činnosti fotovoltaického článku	15
1.3	Ignot monokrystalického křemíku	17
1.4	Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku	18
1.5	Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku	19
1.6	Řez strukturou článku z amorfního křemíku	20
1.7	Struktura FV panelu	21
2.1	V-A charakteristika s vyznačenými základními veličinami	23
3.1	a) Detail poškrábání b) Neobroušená hrana solárního článku	28
3.2	Vírový defekt	29
3.3	Nehomogenita difúzní vrstvy	29
3.4	Vnitřní pnutí	30
3.5	Detail defektu vnitřního pnutí	30
3.6	Metalizace zadní strany prosvítající na přední stranu	31
3.7	Detail chyby přední metalizace	31
3.8	Skrytý lom	32
3.9	Prachové částice, které se dostaly do solárního článku při výrobě	32
3.10	Degradace fólie EVA u různě starých FV panelů	35
3.11	Delaminace fotovoltaického panelu	36
3.12	Proražení bypassové diody	37
3.13	Horká místa (hot spots) na FV panelu	38
3.14	Šnečí cestičky (Snail trails) na FV panelu	39
4.1	a) Analyzátor PROVA 210 b) pracoviště pro měření V-A char.	41
4.2	a) Program Solar Modul Analyzer 12A b) screen obrazovky	41
4.3	Blokové schéma metody FLASH testu	44
4.4	Blokové schéma metody Elektroluminiscence	45
4.5	Grafický průběh teplotního cyklování	47
4.6	Grafický průběh testu mrznoucí vlhkostí	48
5.1	Fotografie panelu Solartec STR 36-50	50
5.2	Fotografie panelu Rich Solar RS-M185	51
5.3	Fotografie panelu Microsol MM0225-G	52
5.4	Fotografie panelu Solartec z polykrystalického křemíku	53
5.5	Fotografie panelu z amorfního křemíku	54
5.6	Měření intenzity dopadajícího záření pomocí pyranometru	55
5.7	V-A charakteristika panelu Solartec STR 36-50 v roce 2012	56
5.8	V-A charakteristika panelu Solartec STR 36-50 v roce 2013	56
5.9	V-A charakteristika panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2012	57

5.10	V–A charakteristika panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2013	58
5.11	V–A charakteristika panelu Microsol MM0225–G v roce 2012	59
5.12	V–A charakteristika panelu Microsol MM0225–G v roce 2013	59
5.13	V–A char. panelu Solartec z polykrystalického křemíku z roku 2012 .	60
5.14	V–A char. panelu Solartec z polykrystalického křemíku z roku 2013 .	61
5.15	Termovizní kamera VarioCam HR	62
5.16	Termovizní diagnostika FV panelů snímek 1	62
5.17	Termovizní diagnostika FV panelů snímek 2	63
5.18	Měřicí pracoviště FLASH testeru	64
5.19	FLASH test panelu Solartec STR 36–50 v roce 2010	65
5.20	FLASH test panelu Solartec STR 36–50 v roce 2012	65
5.21	FLASH test panelu Solartec STR 36–50 v roce 2013	66
5.22	FLASH test panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2010	67
5.23	FLASH test panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2012	67
5.24	FLASH test panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2013	68
5.25	FLASH test panelu Microsol MM0225–G v roce 2010	69
5.26	FLASH test panelu Microsol MM0225–G v roce 2012	69
5.27	FLASH test panelu Microsol MM0225–G po TCT	70
5.28	FLASH test panelu Microsol MM0225–G po HF	70
5.29	FLASH test panelu Solartec v roce 2010	71
5.30	FLASH test panelu Solartec v roce 2012	72
5.31	FLASH test panelu Solartec v roce 2013	72
5.32	FLASH test nevytíženého amorfního panelu	73
5.33	FLASH test vytíženého amorfního panelu	74
5.34	a) CCD kamera s objektivem b) pracoviště pro měření	75
5.35	Elektroluminiscence panelu Solartec STR 36–50 v roce 2010	76
5.36	Elektroluminiscence panelu Solartec STR 36–50 v roce 2012	76
5.37	Elektroluminiscence panelu Solartec STR 36–50 v roce 2013	76
5.38	Detail vírového efektu a pnutí článku Solartec STR 36–50	77
5.39	Elektroluminiscence panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2010	78
5.40	Elektroluminiscence panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2012	78
5.41	Elektroluminiscence panelu Rich Solar RS-M185 v roce 2013	79
5.42	Detail defektního článku panelu Rich Solar RS-M185	79
5.43	Elektroluminiscence panelu Microsol MM0225–G v roce 2010	80
5.44	Elektroluminiscence panelu Microsol MM0225–G v roce 2012	80
5.45	Elektroluminiscence panelu Microsol MM0225–G v roce 2013	81
5.46	Detail defektních článků panelu Microsol MM0225–G	81
5.47	Elektroluminiscence polykrystal. panelu Solartec v roce 2010	82
5.48	Elektroluminiscence polykrystal. panelu Solartec v roce 2012	82

5.49	Elektroluminiscence polykrystal. panelu Solartec v roce 2013	83
5.50	Zvětšení defektu článku panelu Solartec STR 36-50 vlivem degradace	85
5.51	Snížení svítivosti článku panelu Rich Solar RS-M185 vlivem degradace	86
5.52	Zvětšení defektu článku panelu Microsol MM0225-G vlivem degradace	88

SEZNAM TABULEK

1.1	Účinnost jednotlivých typů FV článků	17
5.1	Přehled měřených fotovoltaických panelů	49
5.2	Parametry panelu Solartec STR 36-50	50
5.3	Parametry panelu Rich Solar RS-M185	51
5.4	Parametry panelu Microsol MM0225-G	52
5.5	Srovnání parametrů panelu Solartec STR 36-50	84
5.6	Srovnání parametrů panelu Rich Solar RS-M185	85
5.7	Srovnání parametrů panelu Microsol MM0225-G	87
5.8	Srovnání parametrů panelu Solartec z polykrystalického křemíku . . .	88
5.9	Srovnání parametrů amorfního panelu	89

ÚVOD

Energie se v různých formách vyskytuje všude kolem nás a je jedním z nejdůležitějších faktorů pro samotný život, rozvoj a pokrok společnosti na naší planetě. Celosvětová spotřeba energie každoročně stoupá a jelikož neexistuje nevyčerpatelný zdroj energie, začíná se stále více využívat energie obnovitelné.

Do skupiny obnovitelných zdrojů energie se řadí Slunce, které je nejdůležitějším zdrojem energie pro naši planetu. energii ze Slunce využívají v určité podobě všechny organismy. V dnešní době se čím dál tím více rozmáhá využití solární energie v domácnostech, průmyslu a v oblastech bez elektrické elektřiny.

Věda zabývající se přeměnou sluneční energie na elektrickou se nazývá fotovoltaika. Počátky fotovoltaiky sahají už do devatenáctého století, ale největší skok ve vývoji zaznamenala za posledních 20 let. Solární energie se na elektrickou převádí pomocí fotovoltaických článků. Fotovoltaické články se zapouzdřují do fotovoltaických panelů nebo modulů, které je chrání před povětrnostními vlivy, jako je mechanické poškození, koroze, znečištění, kroupy. apod. S vývojem fotovoltaiky jako vědy, materiálů a dalších aspektů je co největší snaha o co nejvyšší životnost fotovoltaických panelů při stabilitě jejich parametrů v čase a okolním prostředí.

Úkolem této diplomové práce bylo nastudování principů činnosti fotovoltaických panelů a defektů článků ovlivňující jejich kvalitu a měřících metod pro dlouhodobé sledování parametrů vybraných solárních modulů. V praktické části diplomové práce byly panely testovány pomocí venkovních a laboratorních měřících metod. Na základě naměřených hodnot byly sestrojeny grafické závislosti a bylo provedeno srovnání s výsledky měření z předchozích let. U každého panelu byly diagnostikovány defekty na fotovoltaických článcích. Poslední část práce je zaměřena na vyhodnocení změn naměřených výkonů a účinností panelů vlivem degradačních mechanismů a je vypočítána míra jejich degradace.

1 FOTOVOLTAIKA

Fotovoltaika je vědní obor zabývající se procesem přeměny sluneční energie na energii elektrickou. K přeměně využívá fotovoltaické články, které lze popsat jako polovodičové diody s velkou plochou P–N přechodu. Pojem fotovoltaika vznikl spojením dvou slov, řeckého slova $\varphi\omega\varsigma$ [phos], tedy světlo a jména italského fyzika Alessandra Volty. Fotovoltaika se řadí do oblasti obnovitelných zdrojů energie a vzhledem k obrovskému potenciálu sluneční energie, lze do budoucna počítat s tím, že bude mít zásadní roli v energetickém hospodářství naší planety. Časem by mohla energie ze Slunce nahradit fosilní paliva, tepelné elektrárny a další dnes hojně využívané zdroje energie [2].

1.1 Fyzikální princip funkce FV článku

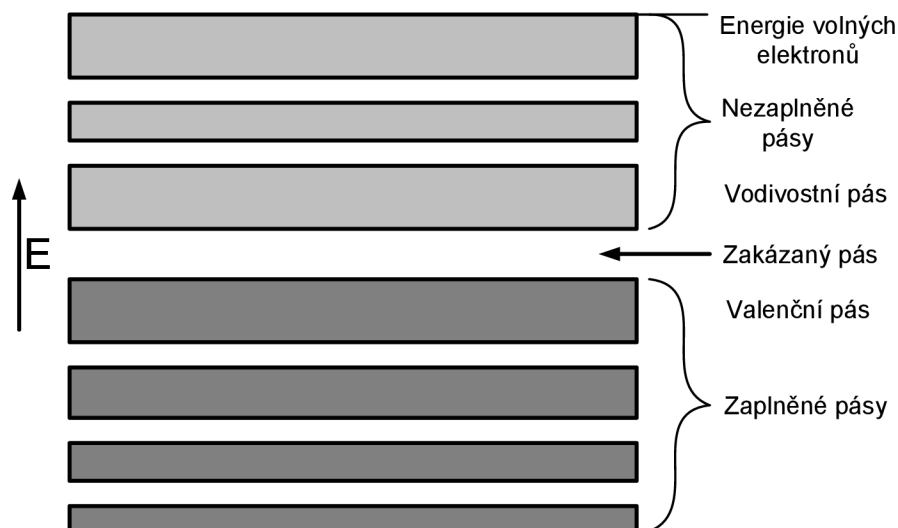
K přeměně energie proudu fotonů (slunečního záření) v energii pohybujících se elektronů (elektrický proud) jsou potřeba dvě věci [3]:

- volné elektrony,
- elektrický potenciál (pole) který je uvede do pohybu směrem od zdroje ke spotřebiči.

Volné elektrony se vyskytují v každém kovu, potíží je ale dodat jim potřebnou energii a usměrnit jejich tok potřebným směrem. Fotony slunečního záření dokáží předat svou energii elektronu v kovu nebo v polovodiči. Při dostatečné energii záření vylétne elektron z povrchu kovu a zanechá po sobě v kovu díru (kladný náboj), což se nazývá fotoelektrický jev [3].

V případě, že elektron v kovu zůstane, je velmi rychle vtažen zpět do nějaké díry a jeho energie se vyzáří do okolí jako neúčinné teplo. Proto je nutné oddělit elektrony a díry a donutit tak elektrony, aby předtím, než zapadnou zpět do díry prošly elektrickým obvodem a vydaly energii získanou ze slunečního záření ve formě užitečné práce ve spotřebiči. Oddělení elektronu od díry se dá lépe realizovat v polovodičích než v kovech [3].

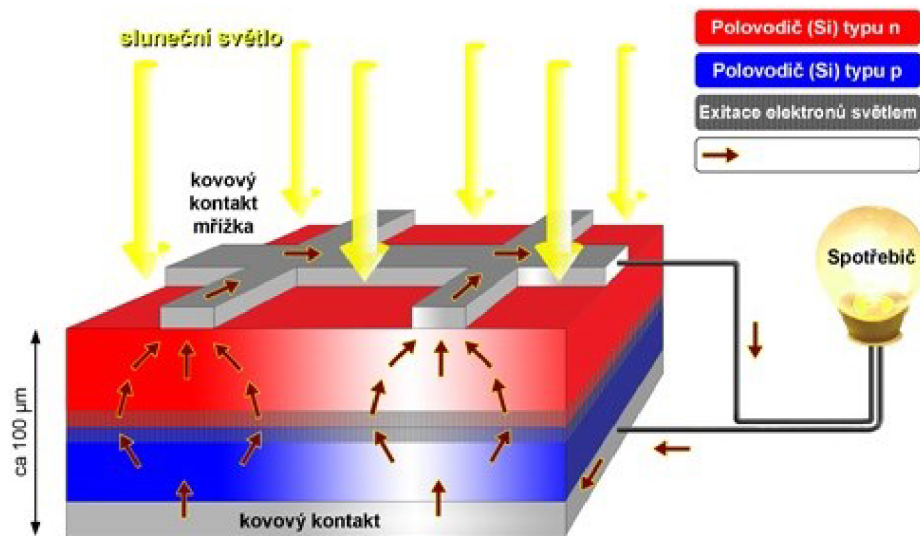
Pro oddělení elektronů z děr je nutné vytvořit v polovodiči takzvaný P-N přechod. P-N přechod v polovodičovém materiálu – křemíku, kdy má atom křemíku ve valenční sféře čtyři elektrony a je tudíž z poloviny zaplněna, potřebuje získat další čtyři elektrony, aby dosáhl stabilního uspořádání valenční sféry (oktet). V krystalu křemíku, tak každý atom zaujme takové uspořádání, že sdílí čtyři elektrony se sousedními atomy, a tak vytvoří čtyři vazby se sousedními atomy [3]. Na Obr. 1.1 jsou znázorněny valenční a zakázané pásy v polovodiči.



Obr. 1.1: Valenční a zakázané pásy v polovodiči [1]

Jelikož má křemík poměrně malou šířku zakázaného pásu, musí se pro praktické využití ve fotovoltaických článcích modifikovat přidáním určitého množství jiných prvků. Tento proces se nazývá dopování. Pokud je do křemíku přidán prvek z 5. skupiny periodické soustavy prvků vznikne křemík typu N jako negativní. Přidáním prvku z 3. skupiny periodické soustavy vznikne křemík typu P jako pozitivní.

Základem FV článku je velkoplošný P–N přechod orientovaný kolmo na plochu článku. Při dopadnu slunečního záření o dostatečně velké energii dojde k uvolnění elektronů a vzniku stejného množství děr. Elektrony z polovodiče typu N se prostřednictvím elektrického pole P–N přechodu přemísťují do polovodiče typu P. Takto vzniklý proud elektronů lze z fotovoltaického článku odvést pomocí vhodných kontaktů umístěných na obou stranách P–N přechodu viz Obr. 1.2. K uvolnění elektronu musí mít foton energii větší než je šířka zakázaného pásu. U křemíku, který má šířku zakázaného pásu přibližně 1,1 eV to znamená, že vlnová délka záření musí být kratší než 1000 nm, jde tedy o oblast infračerveného záření a celou oblast viditelného slunečního záření [1].



Obr. 1.2: Princip činnosti fotovoltaického článku [4]

Velikost proudu, který je schopen fotovoltaický článek vyprodukovat závisí na intenzitě slunečního záření. Hodnota napětí na FV článku souvisí s intenzitou elektrického pole, které umožňuje pohyb elektronů na P–N přechodu. Intenzita elektrického pole je dána šířkou zakázaného pásu polovodičového materiálu. Napětí na článku je poměrně malé, při optimálním proudu a maximálním výkonu článku se hodnota napětí pohybuje kolem 0,5 V. Pro prakticky využitelné napětí je proto nutné spojit řadu fotovoltaických článků do série. Používají se především moduly s 36 nebo 72 články, které jsou schopny vyprodukovat 18 nebo 32 V [3].

1.2 Základní typy fotovoltaických článků

Vývoj fotovoltaických článků probíhá již asi 50 let. Za tuto dobu bylo vyzkoušeno mnoho typů konstrukcí a různých typů materiálu. Při vývoji se klade důraz na co nejvyšší účinnost a životnost FV článků a také na co nejnižší výrobní náklady. Snahou vývojářů je také snižování výsledné ceny za instalovaný výkon.

1.2.1 První generace

Jedná se o fotovoltaické články vyráběné z destiček monokrystalického křemíku, v nichž je vytvořen velkoplošný P–N přechod. Tento typ článků se vyznačuje dobrou účinností okolo 14–17 % a dlouhodobou stabilitou výkonu. V současné době je první generace FV článků stále velmi využívanou technologií pro fotovoltaické systémy, a to zejména pro velké instalace. Hlavní nevýhodou je velká spotřeba velmi čistého křemíku, s čímž je spojena nákladná a náročná výroba těchto článků.

1.2.2 Druhá generace

Druhá generace FV článků se vyznačuje snahou snížit potřebné množství křemíku při jejich výrobě, a tím následně jejich výrobu zlevnit. Využívá tenkovrstvé články, k jejichž výrobě se používá polykrystalický, mikrokrystalický nebo amorfní křemík. Jejich hlavní nevýhodou je zdatelně nižší účinnost asi 10 % a také menší stabilita, kdy jejich účinnost s časem klesá. V poslední době se k jejich výrobě začínají používat i jiné materiály než křemík, například tzv. směsné polovodiče z materiálů jako jsou měď, indium, gallium, selen, atd. V současnosti se tenkovrstvé články prosazují hlavně v systémech, kde je požadována pružnost a ohebnost např. jako součást armádního oblečení, nebo u zařízení, které využívají FV články ke svému napájení (vysílačky, mobilní telefony, apod.) [1].

1.2.3 Třetí generace

Třetí generace FV článků využívá jiné materiály než křemík. Jedná se o kompozitní fotovoltaické články složené z jednotlivých vrstev, které jsou schopny využívat širokou část slunečního spektra. Každá vrstva dokáže efektivně využít světlo v určitém rozsahu vlnových délek a záření, pokud dané záření využít nemůže, propustí ho do hlubších vrstev, kde je využito [1].

1.3 Materiály pro výrobu fotovoltaických článků

Více jak 90 % komerčně dostupných fotovoltaických článků se vyrábí z křemíku. Křemík je nejvíce využívaný materiál pro výrobu polovodičových součástek, proto je jeho technologie výroby na vysoké úrovni a lze tedy vyrábět křemík s vysokou čistotou až 99,9999999 %, jež je pro fotovoltaické články nezbytná. Nároky na čistotu křemíku mají za následek poměrně vysokou cenu tohoto materiálu. V Tab. 1.1 jsou porovnány technologie výroby fotovoltaických článků z hlediska účinnosti [1].

Technologie výroby článku	Běžná účinnost	Max. laboratorní účinnost
Monokrystalický	14-17 %	25 %
Polykrystalický	13-16 %	20 %
Amorfní	5-7 %	12 %

Tab. 1.1: Účinnost jednotlivých typů FV článků [5]

1.3.1 Monokrystalické křemíkové články

Je to základní a nejstarší typ fotovoltaických článků, které jsou složeny z krystalů monokrystalického křemíku o rozměru asi 10 cm. Vyrábí se z ingotů (tyčí) polykrystalického křemíku pomocí Czochralského metody tj. pomalým tažením z roztaveného čistého křemíku. Tyto ingoty jsou pak dále řezány speciální drátovou pilou na plátky silné přibližně 0,25 až 0,35 mm. V současné době lze vyrábět i články o tloušťce 0,1 mm při minimálním odpadu, který při řezání vzniká. Na Obr. 1.3 je znázorněn ingot monokrystalického křemíku.



Obr. 1.3: Ingot monokrystalického křemíku [6]

Plátky se postupně zarovnávají na rovnoměrnou tloušťku, povrch se vyleští a odleptá od nečistot a nepravidelností. Polovodičový P–N přechod na destičkách se pak vytvoří přidávkem fosforu, díky kterému na povrchu vznikne vrstva s vodivostí typu N. Dosažená účinnost v laboratoři je až 25 %. Fotovoltaický článek z monokrystalického je znázorněn na Obr. 1.4.

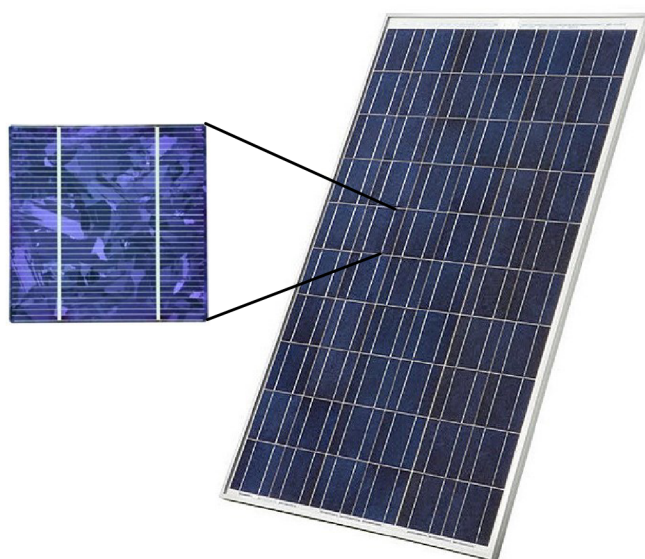


Obr. 1.4: Fotovoltaický článek z monokrystalického křemíku

1.3.2 Polykrystalické křemíkové články

Polykrystalické křemíkové články jsou v současnosti nejběžnějším typem článků. Vyrábějí se tažením monokrystalického křemíku nebo odléváním čistého křemíku do forem s následným řezáním vzniklých ingotů na tenké plátky. Odlévání je podstatně jednodušší než tažení monokrystalu, a proto lze připravit bloky čtvercového nebo obdélníkové průřezu. Nevýhodou odlévání je horší účinnost a nižší proud, protože na styku jednotlivých krystalických zrn je větší odpor, naopak zásadní výhodou je lepší využití materiálu, nižší cena výchozí suroviny a možnost vyrábět články ve větších rozměrech se čtvercovým nebo obdélníkovým tvarem. Nejvyšší dosažená účinnost v laboratorních podmínkách je 20 % [1].

Polykrystalické články mají specifickou strukturu viz Obr. 1.5, která se vyznačuje jasně viditelnými hranicemi krystalů. Jejich specifická struktura byla námětem stavebním architektům, kteří z polykrystalických článků vytváří také fasádní obklady, namísto obkladů z mramoru nebo skla.



Obr. 1.5: Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku

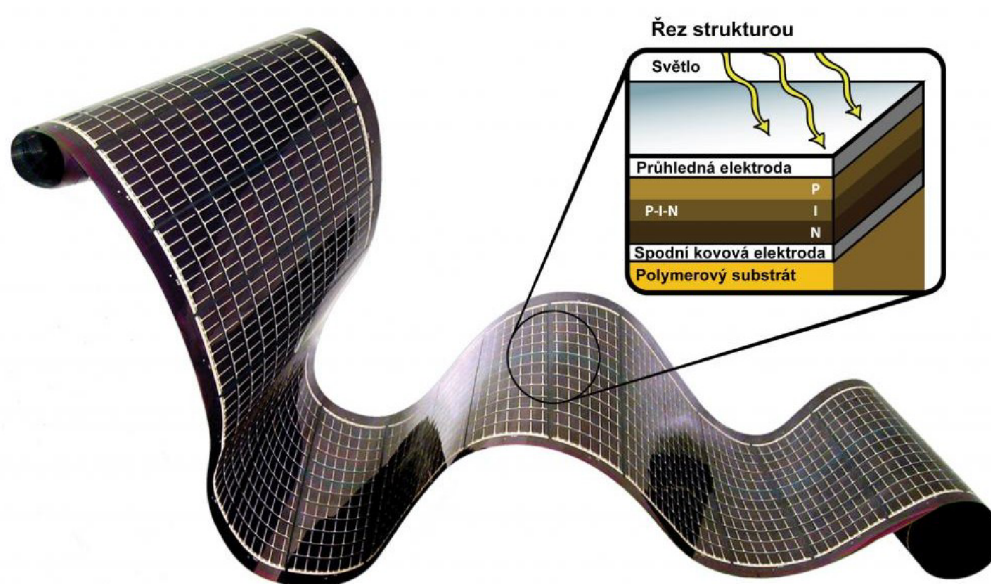
1.3.3 Články z amorfního křemíku

Technologická výroba článků z amorfního křemíku spotřebuje oproti monokrystalickým a polykrystalickým článkům výrazně méně materiálu, což při velkosériové výrobě znamená významnou úsporu nákladů. Proces je založen na rozkladu vhodných sloučenin křemíku, silanu nebo dichlorsilanu ve vodíkové atmosféře. Tímto způsobem lze připravit velmi tenké vrstvy křemíku, které se nanášejí na skleněné, nerezové nebo plastové podložky. Nanesená vrstva je amorfní, tedy nemá pravidelnou krystalickou strukturu, a obsahuje určité množství vodíku. Jelikož má amorfní vrstva větší absorpci slunečního záření, může mít podstatně tenčí tloušťku např. už vrstva o tloušťce 1 mm pohltí 90 % slunečního záření. Lze tedy vyrábět velmi ohebné a tekuté fotovoltaické moduly, které se využívají např. jako krycí fólie na střechy budov [1].

Vzniklý materiál má však oproti krystalickému křemíku daleko nepravidelnější strukturu s velkým množstvím poruch. Některé atomy křemíku nemají sousední atomy, se kterými by mohly tvořit vazbu a jsou na nich tedy mezi sebou „visící“ vazby. Na těchto místech může docházet k rekombinaci nábojů, což má za následek snížení proudu a účinnosti. Částečně je tento problém odstraněn navázáním vodíku na tyto volné vazby. Další nevýhodou je nestabilita způsobená z části právě přítomností vodíku, protože struktura je narušována oxidací vzdušným kyslíkem. V laboratorních podmínkách byla dosažena maximální účinnost 12 %, avšak vlivem

zmíněné nestability dochází k poklesu výkonu, který se teprve časem ustalí zhruba na 80 % původní hodnoty [1].

P–N přechod u článků z amorfního křemíku je složen s horní vrstvy s vodivostí P, která je velmi tenká a tak zachytí pouze malé množství fotonů, teprve pod ní je další tenká vrstva označována i, jež není dopována a v níž dochází k pohlcení většiny dopadajícího slunečního záření a následnému vytvoření volných elektronů a děr. Tím, že elektrické pole P–N přechodu zasahuje přes vrstvu, ve které se tvoří elektrony a díry, dochází k jejich okamžité separaci a tím se snižuje hmotnost jejich rekombinace. Článek z amorfního křemíku je zobrazen na Obr. 1.6.



Obr. 1.6: Řez strukturou článku z amorfního křemíku

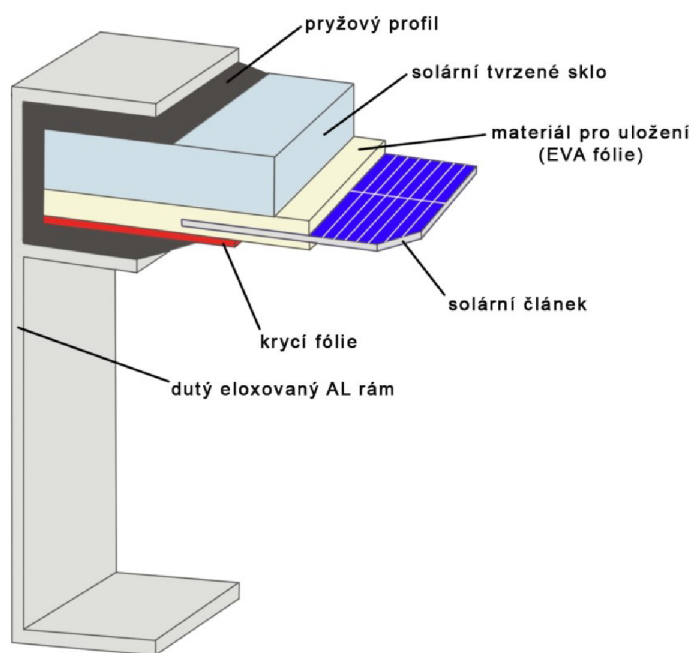
1.4 Fotovoltaické panely

1.4.1 Konstrukce FV panelů

Fotovoltaické články jsou velmi citlivá zařízení, a proto aby spolehlivě plnily svou funkci po dobu řady let, zapouzdřují se do fotovoltaických panelů nebo modulů, které je chrání před povětrnostními vlivy, jako je mechanické poškození, koroze, znečištění, kroupy, apod. [1].

Přední strana panelu je pokryta tvrzeným sklem, které odolá i krupobití a které má také vynikající propustnost světelného záření, takže by téměř nemělo omezovat funkčnost fotovoltaických článků. Na sklo se nanáší fólie EVA (etylvinylacetát), na kterou se již skládají samotné FV články. Články jsou v sériovém nebo paralelním zapojení. U sériového zapojení spojuje kovový pásek přední část jednoho článku se zadní částí druhého článku. Na propojené články se opět nanáší EVA fólie. Zadní strana je tvořena z laminátové kompozice PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Struktura FV panelu je znázorněna na Obr. 1.7.

Vzduch mezi jednotlivými vrstvami je vyčerpán a celý panel se poté zahřeje na teplotu tání EVA fólie, která se roztaví a následně zaplní prostor kolem článků mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou. Panel se pak orámuje hliníkovým rámem, utěsní se silikonovým tmelem a opatří se rozvodnou skříňkou s výstupními kontakty. Takto zhotovené fotovoltaické panely jsou prachotěsné i vodotěsné. Kvalitně zpracované panely na bázi krystalických polovodičů mají životnost 20–30 let [3].



Obr. 1.7: Struktura FV panelu [3]

1.4.2 Konstruktivní řešení fotovoltaických systémů

Velký význam na účinnost FV panelů má jejich vhodné umístění a orientace proti slunci. Panely se nejčastěji umísťují na střechy a fasády budov s orientací na jižní stranu.

Systém s pevným stojanem

Fotovoltaické systémy se orientují přední stranou panelu k jihu a jejich sklon se volí podle zeměpisné šířky tak, aby v poledne dopadalo sluneční záření kolmo na přední stranu panelu. Sklon závisí na způsobu využívání systému. Pokud je systém v celoročním provozu ostrovních systémů, je vhodné volit větší kolmost sklonu, okolo 49° z důvodu nízké polohy Slunce nad Zemí. Při snaze o maximální zisk z vyrobené elektrické energie do sítě se volí sklon 32° [3].

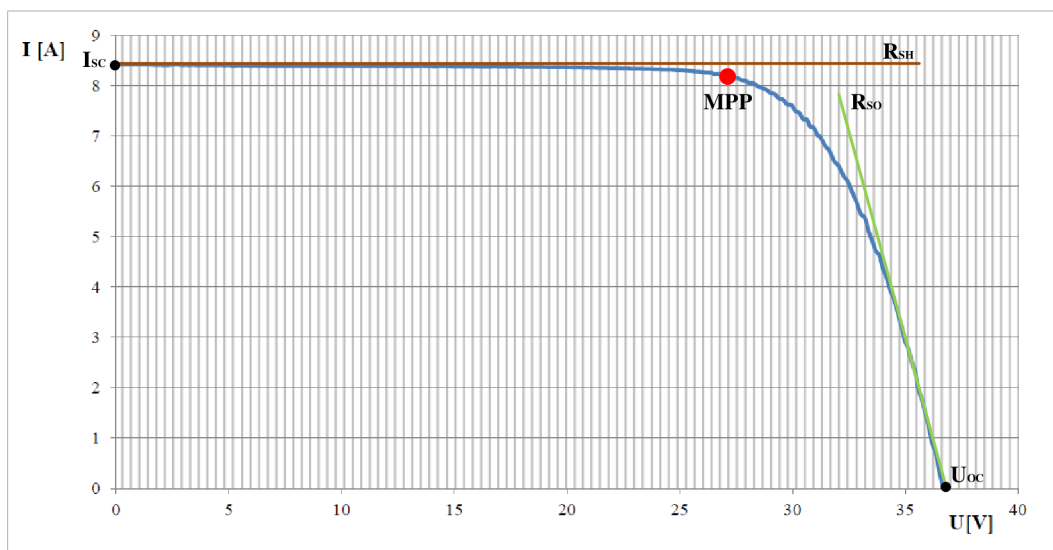
Systém s pohyblivým stojanem

Aplikací těchto fotovoltaických systémů lze dosáhnout významného zvýšení denní produkce elektřiny díky pohyblivému stojanu, který zajišťuje vhodný sklon a natočení vůči slunci a tedy trvalý kolmý dopad slunečního záření na panel. Oproti systémům s pevným stojanem dosahuje systém s pohyblivým stojanem navýšení dopadající energie až o 57 %, v případě, že jsou zanedbány vlivy atmosféry. V reálném provozu, který zahrnuje i vlivy atmosféry, kdy například po východu nebo těsně před západem Slunce prochází sluneční paprsky přes silnou vrstvu atmosféry a intenzita dopadajícího záření je tak menší než dopoledne, lze dosáhnout navýšení množství vyrobené elektrické energie až o 40 %, na území České republiky je to navýšení o maximálně 30 %.

2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ

2.1 Parametry odečtené z V–A charakteristiky

Z voltampérové charakteristiky popisující fotovoltaický panel lze vyčíst některé základní veličiny panelu. V–A charakteristika je grafickou závislostí proudu na napětí viz Obr. 2.1 [8].



Obr. 2.1: V-A charakteristika s vyznačenými základními veličinami [8]

2.1.1 Zkratový proud

Zkratový proud I_{sc} je maximální proud při daném osvětlení a při nulovém napětí, je tedy roven proudu generovanému světlem $I_{sc} = I_L$, za předpokladu že odpor R_{so} je nulový. Velikost zkratového proudu je závislá na intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti, ozářené ploše a teplotě a pohybuje se řádově v jednotkách až desítkách A [8].

2.1.2 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno U_{oc} je maximální napětí na výstupních svorkách fotovoltaického panelu při nulovém proudu a bez připojené zátěže. U_{oc} je to maximální napětí foto-

voltaického panelu při dané teplotě a intenzitě osvětlení. Velikost napětí naprázdno se pohybuje v desítkách až stovkách V [8].

2.1.3 Pracovní bod

Pracovní bod PB je bod na V–A charakteristice, ve kterém fotovoltaický panel zrovna pracuje. Poloha pracovního bodu je závislá na vlastnostech spotřebiče a měla by být shodná s polohou bodu s maximálním výkonem MPP (Maximum Power Point). Leží-li pracovní bod v bodě zkratového proudu nebo napětí naprázdno, negeneruje panel žádný výkon.

Pracovní bod je velmi závislý na teplotě. Pokud jsou zhoršené chladicí podmínky (např. bezvětří), kdy teplota vzduchu dosahuje až ke 40 °C nebo na panel dopadá po delší dobu sluneční záření s vysokou intenzitou, dochází ke zvýšení povrchové teploty panelu až na 80 °C, což má za následek změnu jeho elektrických vlastností, která vede ke snížení svorkového napětí na zatěžovací charakteristice. Pokles svorkového napětí má za následek snížení dodávaného výkonu do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě při největší sluneční intenzitě, může dojít až ke ztrátě 70 % dosažitelné denní výroby panelu. Jako kompenzace toho jevu slouží optimalizační zařízení, které pracuje na principu řízení optimálního odporu zátěže [8].

2.1.4 Bod maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point)

Bod maximálního výkonu MPP je bod na V–A charakteristice, který udává hodnotu maximálního výkonu. Bod MPP se udává prostřednictvím proudové a napěťové souřadnice z V–A charakteristiky:

- U_{mpp} – napětí, při kterém fotovoltaický článek dodává maximální výkon,
- I_{mpp} – proud, při kterém fotovoltaický článek dodává maximální výkon,
- P_{mpp} – maximální výkon, který se nachází v bodě uprostřed ohybu V–A charakteristiky.

2.1.5 Maximální výkon

Maximální výkon P_{mpp} je hodnota výkonu, kterou je schopen panel dodávat. Bod P_{mpp} je přibližně ve středu ohybu voltampérové charakteristiky. Hodnota maximálního výkonu je dána vztahem (2.1) [8].

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

kde U_{mpp} napětí v bodě maximálního výkonu panelu, I_{mpp} je proud v bodě maximálního výkonu panelu [8].

Sledovač maximálního pracovního bodu se snaží přizpůsobovat parametry zátěže tak, aby článek dodával neustále co nejvyšší výkon.

2.1.6 Fill Factor

Fill Factor FF udává poměr mezi maximálním výkonem P_{mpp} a výkonem daným zkratovým proudem I_{SC} a napětím na prázdko U_{OC} . Závisí na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Je nazýván také činitelem plnění, čím je jeho hodnota vyšší, tím větší výkon je schopen fotovoltaický panel do zátěže dodat. Obvyklá hodnota FF se pohybuje kolem 0,7 až 0,85 u panelů monokrystalického a polykrystalického křemíku, u amorfních panelů té bývá kolem 0,6. Fill Factor se dá vyjádřit vztahem (2.2) [8]:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \eta_{ef}. \quad (2.2)$$

2.1.7 Účinnost fotovoltaického panelu

Účinnost fotovoltaického panelu EEF je dána vlastnostmi materiálů, ze kterých je panel a fotovoltaický článek vyroben. Materiál ovlivňuje spektrální citlivost článku na dopadající záření, což znamená, že článek panelu využívá energii různých vlnových délek s různou účinností. Panely s monokrystalickými články dosahují účinnosti 15 až 18 %, panely s polykrystalickými v rozsahu 13 až 16 %. Účinnost článku fotovoltaického panelu lze definovat vztahem (2.3) [8]:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{rad}} = \frac{P_{mpp}}{E \cdot A_c}, \quad (2.3)$$

kde P_{rad} je výkon dopadajícího záření, E je intenzita osvětlení při standardizovaných zkušebních podmínkách, A_c je plocha fotovoltaického článku [m^2].

2.2 Parametry ovlivňující účinnost fotovoltaického panelu

2.2.1 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor článku panelu R_m je důležitým parametrem, protože na vnitřním odporu dochází k nežádoucímu úbytku napětí. Vnitřní odpor článku při maximálním výkonu je dán vztahem (2.4) [8]:

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

2.2.2 Reflexivita

Reflexivita R je odvozena z indexu lomu polovodiče podle vztahu (2.5) [8]:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2. \quad (2.5)$$

2.2.3 Sériový a paralelní odpor

Sériový a paralelní odpor udává kvalitu fotovoltaického článku panelu. Sériový parazitní odpor je odvozen z celkového odporu materiálu polovodiče a odporu kontaktů a propojení. Vysoká hodnota sériového odporu má za následek úbytek napětí na sériovém odporu a v důsledku toho i úbytek napětí na svorkách panelu. Paralelní parazitní odpor může být způsoben rozsáhlými defekty krystalické mřížky, nebo svodovým proudem kolem okrajů článku. Příliš nízká hodnota paralelního odporu deklaruje vadný článek, který se chová jako by byl zevnitř zkratován [9].

3 DEFEKTY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ A PANELŮ

3.1 Defekty fotovoltaických článků

Defekty solárních článků vznikají již při samotné výrobě křemíku nebo při následném technologickém procesu výroby článku. Defekty solárních článků, tak lze rozdělit do základních dvou skupin [10]:

- materiálové defekty (Grow Defects),
- procesní defekty (Processing Induced Defects).

Obecně jsou všechny vady nežádoucí a v závislosti na vážnosti daného defektu méně či více snižují účinnost solárního článku.

3.1.1 Materiálové defekty (Grow Defects)

Materiálové defekty jsou vady solárních článků, vzniklé při výrobě křemíku. Mezi nejznámější patří tzv. virové defekty (Swirl Defects). Jedná se o defekt tvaru soustředných kružnic vycházejících od středu, které vznikají při výrobě křemíkového ingotu (CZ Si). Kružnice vznikají z důvodu injekce příměsí kyslíku do křemíku rozpouštěním křemenných nádob při rotačním pohybu během Czochralského metody. Celkovou hustotu těchto vrstevných chyb lze ovládat úrovní koncentrace kyslíku a stupněm jeho precipitace v SiO_2 . Nežádoucí kyslík je pak možno přesunout na okraj křemíkového ingotu pomocí regulace rychlosti tažení, který se následně ořízne.

U solárních článků mají virové defekty vliv na umístění molekul kyslíku v P-typu křemíkového polovodiče, kde fotony dopadající na P–N přechod solárního článku vytvoří pár elektron–díra. Následkem virových defektů dochází k rekombinaci části vytvořených elektronů a děr na kyslíkových centrech, čímž dojde ke snížení celkové doby života nosiče elektrického proudu. Energie uvolněná při rekombinačním procesu se vyzáří do prostoru jako teplo a tím dochází ke snížení celkové účinnosti článku [10].

3.1.2 Procesní defekty (Processing Induced Defects)

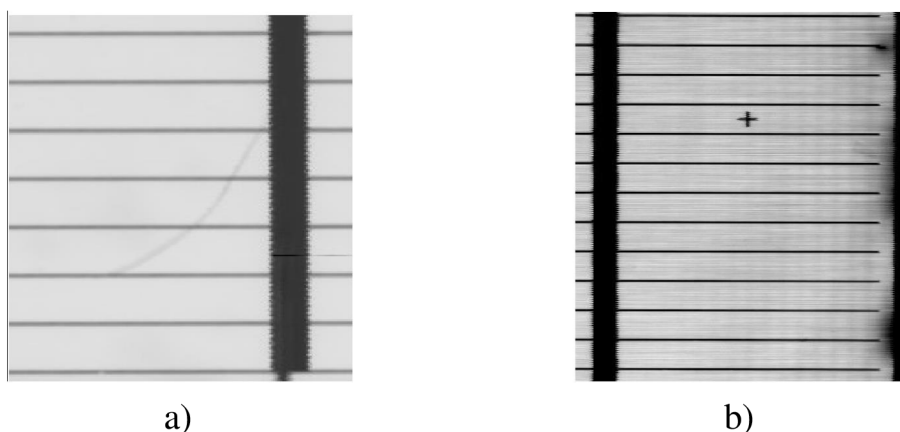
Jako základní procesní defekty považujeme [10]:

- **mechanické poškození** – poškrábání povrchu solárního článku, okrajové odštípnutí, neobroušené hrany. Důsledkem je například zkrat přední a zadní strany panelu.,
- **nehomogenita difúzní vrstvy.**

Nejčastějším jevem je mechanické poškození které vznikne špatnou manipulací se solárním článkem. Následkem mechanického poškození jsou porušené pyramidky uvnitř článku, což vyvolá lokální odstranění P–N přechodu. Špatnou manipulací může také dojít k vnitřnímu lomu a neobroušeným hranám. Dalším mechanickým poškozením může být nedokonalé provedení metalizace. Nečistoty v křemíku je možné třídit podle naměřené ionizační energie.

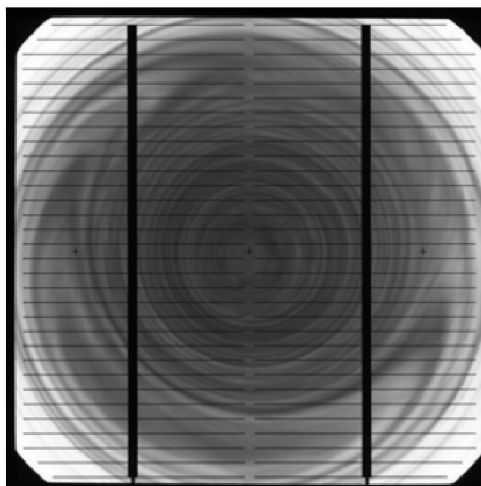
3.1.3 Přehled defektů

- Mechanické poškození – vzniká neopatrným zacházením se solárním článkem např. zasouváním jednotlivých článků do zásobníku, posunem článku po pásu nebo ořezáním článku. Mezi mechanické poškození se řadí usazená špína na povrchu článku, neobroušené hrany článku a hlavně poškrábání povrchu. Při poškrábání dochází k deformaci vrchní vrstvy solárního článku, což může mít za následek porušení P–N přechodu v tomto místě, v jehož důsledku dojde k mikroskopickému lavinovému průrazu. Defekt neobroušených hran je způsoben špatným zabroušením hran solárního článku, čímž dochází ke zkratu spodní a vrchní části.



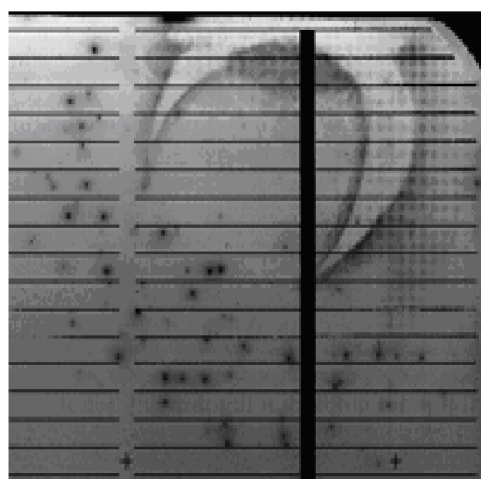
Obr. 3.1: a) Detail poškrábání b) Neobroušená hrana solárního článku, vznik zkratových oblastí [10]

- Vírový defekt – vzniká při výrobě monokrystalického křemíku (při aplikaci Czochralského metody) z důvodu vzniku příměsí, které se přimíchají do pomalu tuhneícího roztoku, nejčastěji je to příměs SiO_2 . Následkem tohoto defektu je většinou znehodnocení celého materiálu.



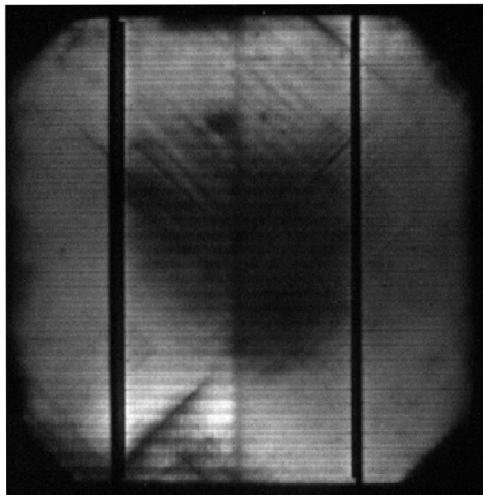
Obr. 3.2: Vírový defekt [10]

- Nehomogenita difúzní vrstvy – vzniká během procesu difúze, tzn. rozptýlu látky fosforu v materiálu křemíku, kdy jsou na P–N přechodu rozptýleny kromě částic fosforu i nevyžádané nečistoty, které mají za následek nehomogenitu.



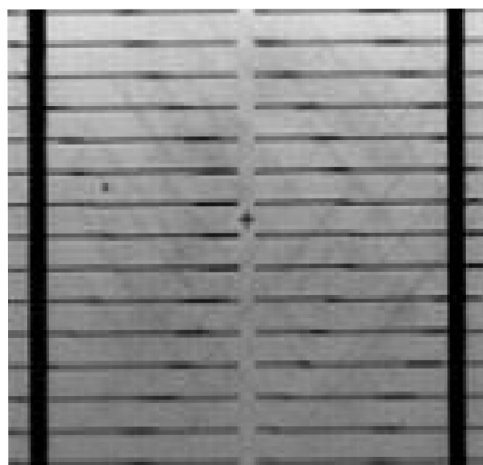
Obr. 3.3: Nehomogenita difúzní vrstvy [10]

- Vnitřní pnutí – k této vadě dochází při výrobě křemíku, konkrétně při jeho špatném chlazení. Chladicí proces musí být velmi pomalý a řízený. Následkem tohoto defektu je deformace plochy, případně až prasknutí a to i při relativně malém tepelném namáhání. Tato vada může ovlivnit více po sobě jdoucích článků, což je velmi nežádoucí.



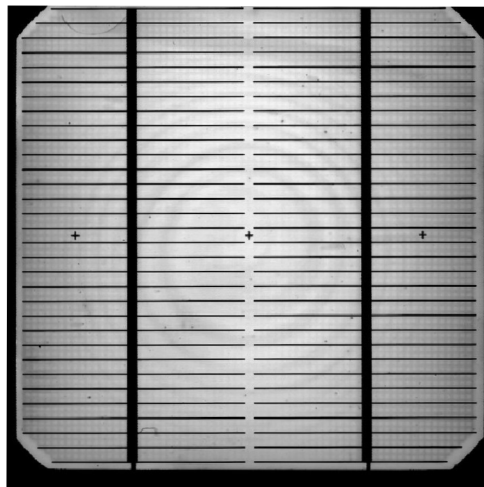
Obr. 3.4: Vnitřní pnutí [10]

Na Obr. 3.5 je vidět detail vnitřního pnutí v solárním článku.

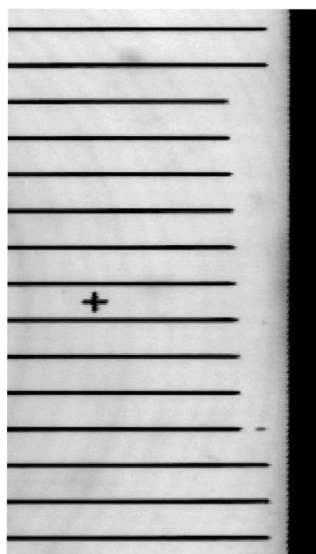


Obr. 3.5: Detail defektu vnitřního pnutí [10]

- Chyby metalizace – tato závada je způsobena nedotažením sítotisku, kterým se nanáší vrchní metalizace. Následkem tohoto defektu je pak špatný odvod generovaného proudu ze solárního článku.

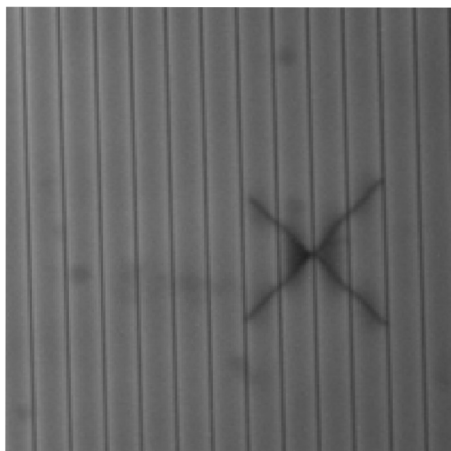


Obr. 3.6: Metalizace zadní strany prosvítající na přední stranu [10]



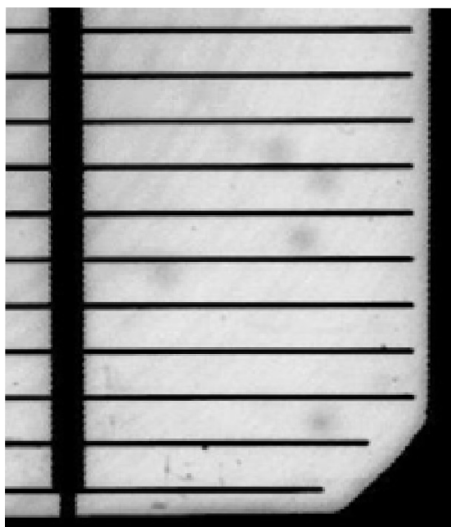
Obr. 3.7: Detail chyby přední metalizace [10]

- Skrytý lom – závada se projevuje prasklinou, která na první pohled nemusí být viditelná. Tlakem na solární článok ve více směrech může dojít k jeho poškození. Skrytý lom se pak během manipulace může projevit i úplným odlomením části solárního článku.



Obr. 3.8: Skrytý lom [10]

- Prachové částice – defekt způsobený vznikem nečistot, tedy prachových částic do výrobního procesu. Částice prachu jsou difúzí zataveny do základního materiálu, ve kterém způsobují defekt.



Obr. 3.9: Prachové částice, které se dostaly do solárního článku při výrobě [10]

3.1.4 Degradace FV článků dopadajícím zářením

U degradace fotovoltaických článků vlivem dopadajícího záření se klasifikují dva mechanismy, kde v obou případech je aktivním prvkem bór, kterým jsou články nejčastěji dopovány. Degradace se projevuje pouze u fotovoltaických článků P typu v monokrystalickém i polykrystalickém křemíku. Články typu N, které jsou dopované fosforem nebo arsenem, degradaci vlivem světelného záření nepodléhají ani v případě vyššího obsahu kyslíku v základním materiálu [11]:

- **disociace párů bór-železo** – při kontaminaci materiálu železem,
- **formování rekombinačně aktivních komplexů bór-kyslík** – v křemíku s vysokým obsahem kyslíku vyrobeném metodou Czochralského.

Byly zjištěny dvě hlavní příčiny degradace fotovoltaických článků z monokrystalického i polykrystalického křemíku dopovaného bórem. Obě příčiny jsou elektricky řízené reakce defektů pomocí substitučních atomů bóru (B_s), kdy při osvětlení fotovoltaického článku dochází ke značnému zkrácení doby života nosičů náboje do jejich rekombinace [11].

Disociace párů bór-železo

V křemíkovém polovodiči typu P se vytváří páry intersticiálního železa (Fe_i) se substitučním bórem (B_s). Tyto páry (Fe_iB_s) pak při osvětlení vlivem rekombinačního procesu disociují.

V případě, že je fotovoltaický článek ponechán bez osvětlení při teplotě okolo 25°C dochází k reformaci párů v průběhu řádově jednotek hodin na typickou rezistivitu přibližně o hodnotě $1\ \Omega\text{cm}$, což znamená, že doba života nosičů v křemíku, jež byl kontaminován železem a dopován bórem, je určena samotným železem, páry nebo kombinací obou.

Jestliže je článek zastíněn a vložen do temného prostředí při pokojové teplotě, záporně nabitě částice železa jsou nadále pohyblivé a při setkání s kladně nabitým atomem bóru dojde opět ke vzniku páru (Fe_iB_s). V konečném důsledku to znamená, že původní účinnost a doba života nosičů náboje je při teplotě pod 100°C a po určité době uložení v temnu obnovena [11].

Komplexů bór-kyslík

Vlivem formování komplexu bór-kyslík se může degradace vyskytovat i u vysoce čistého křemíku, jež nebyl kontaminován železem, ale byl vyroben Czochralského metodou. Degradace defektů bór-kyslíkových komplexů roste lineárně s koncentrací substitučního bóru (B_s) a kvadraticky s koncentrací intersticiálního kyslíku (O_i). Degradace světlem se projevuje u materiálu s obsahem kyslíku vyšším než $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Při osvětlení článku klesá jeho účinnost řádově v jednotkách procent a až do doby dosažení stabilního stavu článku. To samé platí i u doby života nosičů náboje.

Obnovení původních parametrů článku, lze provést zahřátím článku na teplotu vyšší jak 200°C po dobu deseti až patnácti minut. Pokud je zahřívání prováděno tepelnou lampou, působí proti sobě proces degradace a regenerace a k obnovení původních parametrů článku nemusí vůbec dojít. Při zahřívání za tmy působí pouze regenerační efekt, kterým lze docílit i zvýšení hodnot parametrů nad původní úroveň. U fotovoltaického článku, ponechaného v temném prostředí o nízké teplotě, nebyl pozorován žádný efekt [11].

3.2 Defekty fotovoltaických panelů

3.2.1 Potenciální indukovaná degradace

K potenciální indukované degradaci PID (Potential Induced Degradation) dochází pokud je fotovoltaický panel vystaven tendenci vysokého negativního napětí mezi články a zemí, kdy potenciál napětí se vůči zemi FV článků podle délky stringu a typu používaného střídače obvykle pohybuje mezi -200 V a -350 V . Rám FV panelů naproti tomu má potenciál 0 V , protože z bezpečnostních důvodů musí být uzemněný. Toto elektrické napětí mezi články a rámem může způsobit uvolnění elektronů z materiálů použitých ve FV panelu, které migrují do elektrického pole a následně dochází jejich vybití přes uzemněný rám. Výsledkem je polarizace elektrického náboje, která může negativně ovlivnit výkonovou křivku fotovoltaických panelů. V praxi se pak degradace PID projevuje tak, že elektrony uvolněné při procesu přeměny světla na elektrickou energii jsou vytrhnuty a přes nulový potenciál uzemněny. Potenciální indukovaná degradace může být urychlena vysokým napětím systému, teplotou a vysokou vlhkostí [15].

3.2.2 Degradace FV panelů dopadajícím zářením

U fotovoltaických panelů se standardními fotovoltaickými články ze Solar Grade křemíku se projevuje degradace vlivem dopadajícího záření. Tato degradace se nazývá LID (Light Induced Degradation) a negativně působí na minoritní nosiče náboje, tak

že jim zkracuje jejich životnost. Podobný jev se vyskytuje také u polykrystalického křemíku, jež podlehl kontaminování fosforem.

Intenzita slunečního záření značně ovlivňuje řadu parametrů FV panelů. Nejvýraznější změnu lze pozorovat u napětí a proudu jako funkce intenzity dopadajícího záření. V podstatě se jedná o lineární nárůst proudu v důsledku zvýšené generace párů elektron–díra [11].

Vlivem působením ultrafialového záření dochází k degradaci použitých materiálů, zejména ke změně barvy fólie EVA. Působením vysoké teploty a ultrafialového záření dochází nejprve ke žloutnutí, poté až k hnědnutí směrem od středu fotovoltaického článku k jeho okraji viz Obr. 3.10 [12].

Na změnu odstínu barvy může mít, kromě okolní teploty a dopadajícímu záření, vliv i vnitřní odpor článku a s ním spojeno zahřívání článku. V reálných podmínkách pak některé buňky vykazují vyšší stupeň zbarvení, což má za následek zastínění článku a následný pokles jeho výkonu.

Degradace křemíku vlivem dopadajícího záření se projevuje snížením hodnot elektrických parametrů. Po 24 hodinovém osvětlení článku může být pokles výkonu článku až v řádku jednotek procent [11] .

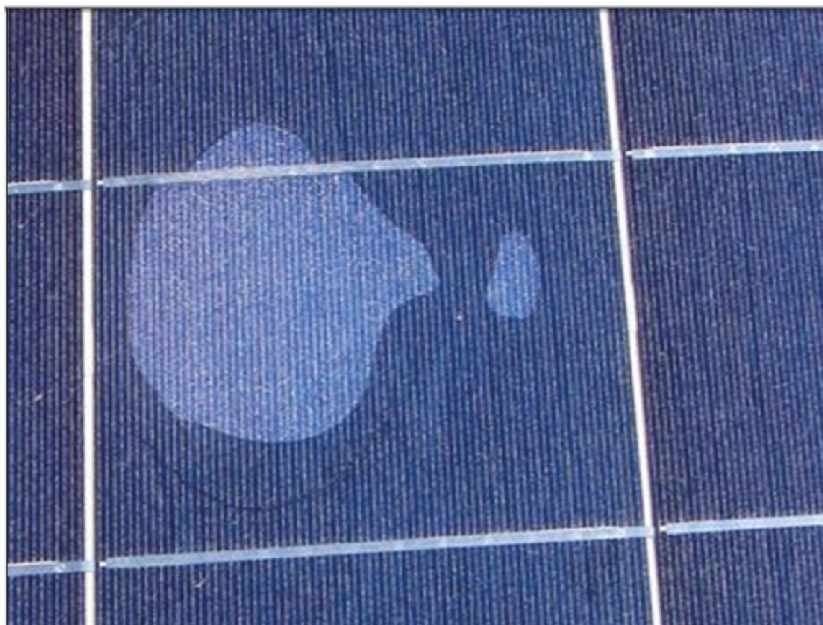


Obr. 3.10: Degradace fólie EVA u různě starých FV panelů [12]

3.2.3 Delaminace FV panelu

Delaminace fotovoltaického panelu se projevuje separací jednotlivých částí panelu, zejména pak fólie EVA od FV článků a tvrzeného skla. Důsledkem této separace je vznik různých dutin a bublin mezi jednotlivými vrstvami panelu. Delaminace je

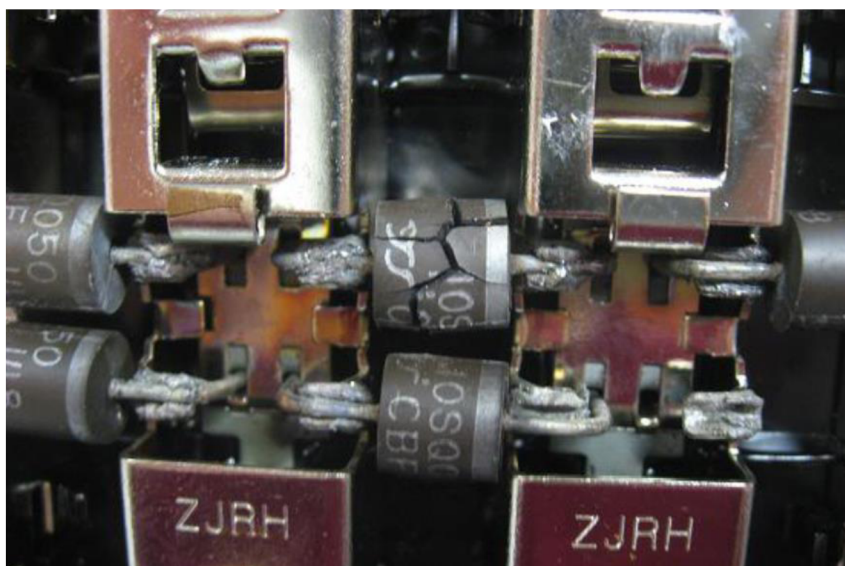
závažná porucha, protože působením korozivních účinků vody s chloridy, dochází k vyplnění vzniklých dutin a k následnému porušení správné funkčnosti fotovoltaického panelu. Defekt delaminace je zobrazen na Obr. 3.11 [13].



Obr. 3.11: Delaminace fotovoltaického panelu [13]

3.2.4 Proražení/vyhoření bypassové diody

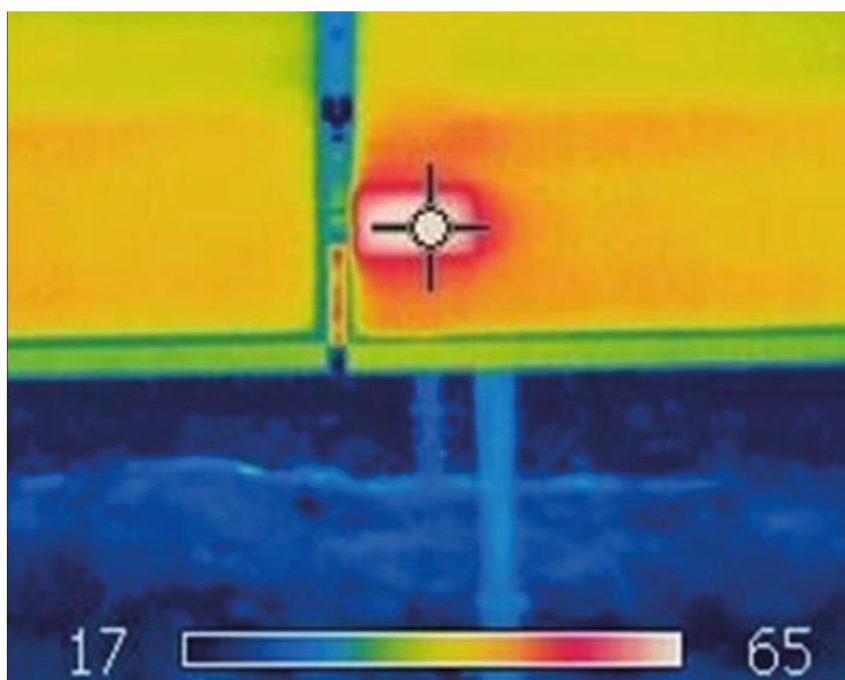
Bypassové diody mají velký význam v případě, že některé články jsou méně osvětleny, nebo zastíněny. V případě zastínění jednoho článku panelu dochází k situaci, kdy se zastíněný článek přestává chovat jako zdroj elektrické energie a energii vyprodukovanou ostatními články v panelu začíná spotřebovávat, čímž dochází k jeho přehřívání a může dojít k nevratnému poškození. Poškození bypassových diod představuje v podobných situacích velký problém a v konečném důsledku ovlivňuje výkon i životnost panelu. Proražení bypassové diody je zobrazeno na Obr. 3.12 [13].



Obr. 3.12: Proražení bypassové diody [13]

3.2.5 Horká místa (Hot spots)

Velmi častým defektem fotovoltaických panelů je vznik horkých míst, tzv. hot spots. Horká místa vznikají v místech defektů krystalické mřížky fotovoltaických článků. Důsledkem jsou pak tzv. mikro-minicras spojené s nadměrným produkováním tepla. Dle několikaletých zkušeností lze konstatovat, že teplotní zdvih horkých míst větší než 50°C oproti teplotě okolních článků začíná být kritický a může vést k destrukci FV článku a tím i celého FV panelu. Vznik horkých míst lze vizuálně pozorovat zhnědnutím zadní strany panelu, prostým pohmatem rukou, nebo snímáním termovizní kamerou, či elektroluminiscencí, které poskytují přesnější výsledky. Na Obr. 3.13 je zobrazena ukázka horkého místa na fotovoltaickém panelu [13].



Obr. 3.13: Horká místa (hot spots) na FV panelu [13]

3.2.6 Šnečí cestičky (Snail trails)

Na povrchu fotovoltaických článků, pod krycím sklem a laminační vrstvou se po několika měsících provozu začínají objevovat změny zabarvení ve tvaru tmavých, rovných či různě zakřivených, případně se větvících linií či cestiček o šířce cca 0,5–1 cm, v některých případech se objevuje tmavěji zbarvené orámování na vnějších okrajích fotovoltaických článků. Šnečí cestičky jsou ohraničeny jednotlivými články, bývá jimi obvykle postiženo více článků v panelu, ale nejsou postiženy všechny moduly rovnoměrně. K jevu dochází i polykrystalických i monokrystalických panelů. Postiženy jsou panely různých výrobců z Evropy, Asie i USA [14].

Nejčastější teorií je, že šnečí cestičky vznikají kombinací několika faktorů [14]:

- mikrotrhliny ve fotovoltaických člancích,
- použitá fólie EVA (etylvinylacetát) a chemické komponenty použité při její výrobě,
- pravděpodobné pronikání vlhkosti do struktury FV panelu,
- fyzikální a chemické jevy probíhající ve FV panelu při dlouhodobé expozici slunečnímu záření a provozním podmínkám venkovní prostředí.

Dle nejnovějších teorií dochází k difúzi některých chemických komponentů EVA fólie přes mikrotrhliny v člancích na lícovou stranu, kde dochází k oxidaci stříbrných kontaktů, případně depozici polymerů pocházejících z EVA fólie a následné změně zabarvení. Ukázka šnečích cestiček je zobrazena na Obr. 3.14 [14].



Obr. 3.14: Šnečí cestičky (Snail trails) na FV panelu [14]

4 DIAGNOSTICKÉ METODY FV PANELŮ

Testování fotovoltaických panelů hraje významnou roli ve výzkumu, vývoji i v samotném výrobním procesu. Diagnostické metody pomáhají odhalit defekty jak samotných panelů, tak jednotlivých fotovoltaických článků a pomáhají jejich rychlé identifikaci [10].

- **Měření elektrických parametrů** – metody testující elektrické parametry fotovoltaického panelu (např. měření V–A charakteristik, sluneční simulátor s testerem, šumové charakteristiky, měření kapacit, atd.)
- **Optická diagnostika** – metody, které detekují defekt pomocí světla v ploše fotovoltaického článku. Tyto metody využívají vizuální zobrazení výsledku (např. Elektroluminiscence, LBIC, LBIV, atd.)

V současné době je možné k testování vybírat z velkého množství metod. Základními kritérii ve výběru vhodné metody pro testování je cena, dostupnost, rychlost a množství získaných informací. Na výběr jsou také metody kombinující měření elektrických parametrů a vizuální zobrazení defektu [10].

4.1 Venkovní metody měření

4.1.1 Měření V–A charakteristiky pomocí testeru PROVA 210

K měření V–A charakteristik panelů pod přímým dopadem světla ve venkovním prostředí byl využit analyzátor PROVA 210 od společnosti Micronix společně se softwarovým programem Solar Module Analyzer 12A. Během měření byl analyzátor připojen k PC prostřednictvím rozhraní USB, na svorky analyzátoru byly postupně připojovány všechny měřené panely. Pro správný výpočet výkonu panelu byly v programu Solar Modul Analyzer 12A nastaveny příslušné parametry měření, např. hodnota aktuální intenzity záření. Naměřená data lze pak vyexportovat a dále z nich sestavit grafické průběhy. Výhodou měření pomocí analyzátoru PROVA 210 je rychlost a jednoduchost měření a získání výsledků, poměrně velká přesnost přístroje, nevýhodou měření je pak to, že vzhledem k venkovnímu prostředí, nelze zaručit vždy shodné podmínky pro všechna testování. Na Obr. 4.1 je zobrazen analyzátor Micronix PROVA 210 a měřící pracoviště pro měření V–A charakteristik jednotlivých panelů, na Obr. 4.2 je zobrazeno okno softwarového programu Solar Modul Analyzer 12A a screen obrazovky analyzátoru PROVA 210 s graf. průběhem.

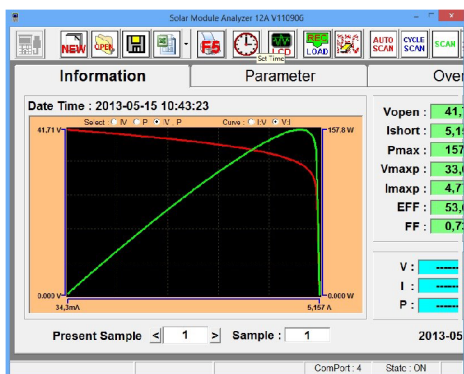


a)

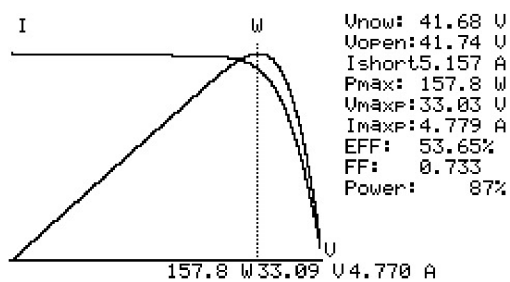


b)

Obr. 4.1: a) Analyzátor PROVA 210 b) pracoviště pro měření V–A charakteristik



a)



b)

Obr. 4.2: a) Softwarový program Solar Modul Analyzer 12A b) screen obrazovky

4.1.2 Termovizní diagnostika fotovoltaických panelů

Pomocí termovizní diagnostiky lze zobrazit rozložení povrchových teplot na fotovoltaickém panelu. Výhodou termovizní diagnostiky je rychlost měření a především to, že lze použít ke skenování již nainstalovaných panelů, které jsou již uvedeny v provozu, bez nutnosti jejich odpojování.

Pro termovizní diagnostiku fotovoltaických panelů je nutné zajistit příslušné podmínky měření, zejména je potřebná dostatečně velká intenzita záření tepelného toku, kdy minimální doporučená hodnota pro měření je $500\text{W}/\text{m}^2$.

Při měření fotovoltaických panelů z přední strany je termokamerou zobrazováno rozložení teplot na povrchu skla panelu. Jelikož tvrzené sklo panelu se vyznačuje nízkou emisivitou, je jeho diagnostika velmi obtížná. Tvrzené sklo odráží tepelný tok emitovaný okolními objekty, což může mít za následek zobrazení nesprávné teploty a defektů na termogramu. Aby se odražené teploty na termogramu nezobrazovaly, je nutné provádět měření pod úhlem 5 až 60° [16].

Ve většině případů lze provádět diagnostiku ze zadní strany panelů. Výhodou je minimalizace rušivých vlivů okolních tepelných zdrojů, nižší odrazivost zadní strany na rozdíl od tvrzeného skla na přední straně. Naměřené hodnoty budou vyšší než při měření přední strany z důvodu vyššího tepelného toku přes menší tepelný odpor.

Na výsledky měření mají velký vliv teplotní a povětrnostní podmínky. Při větru dochází ke konvenčnímu ochlazování panelů, a tím ke vzniku chyb při vyhodnocování teploty jednotlivých fotovoltaických článků. Ideální pro měření je nízká teplota okolního prostředí, která způsobuje vyšší teplotní kontrast a tím usnadňuje vyhodnocování snímků. Nejpriznivější podmínky pro měření jsou tedy za chladného a bezvětrného počasí [16].

Defekty odhalené pomocí termovizní diagnostiky

- **Efekt připojovací krabice (Junction box effect)** – na panelech bez defektů se mohou vyskytnout místa se zvýšenou teplotou. Většinou jde o místo, kde se nachází připojovací krabice (Junction box). Toto zvýšení teploty má pak za následek rozdíl napětí U_{OC} , což vede k nesouladu napětí sousedních článků a ke vzniku efektu částečného stínění. Jelikož je jev zvýšené teploty v těchto místech konstantní, vede k degradaci materiálu, která má za následek snížení výkonu panelu [16].
- **Tmavnutí fólie EVA** – snímky článků s rozdílnými stupni hnědnutí fólie EVA pořízené termokamerou ukazují rozdílné rozložení teplot, kdy tmavší články

viz Obr. 3.10 vykazují oproti světlejším článkům zvýšenou teplotu. Tato skutečnost opět vede ke zrychlenému stárnutí a ke ztrátě výkonu panelu [16].

- **Poškození struktury panelu a degradace sběrnice** – pomocí termokamery lze detekovat i poškození panelu, které nemusí mít vliv na jeho funkčnost a výkon jako je poškození struktury panelu nebo degradace sběrnice. V praxi to pak vypadá tak, že vlivem teplotního namáhání zkorodované sběrnice mohou vzniknout na zadní straně panelu puchýře [16].

4.2 Laboratorní metody měření

4.2.1 Měření FV panelů FLASH testem

Měření fotovoltaických panelů pomocí FLASH testu patří mezi základní metody pro měření výkonových charakteristik FV panelů. Každá panel má absolvovat minimálně jeden FLASH test hned po výrobě, který má za cíl odhalit výrobní vady a zda nový panel splňuje parametry udávané výrobcem. Používají se speciálně vyvinuté zdroje světla, které mají co nejpřesněji simulovat spektrum slunečního záření v celém viditelném spektru. Jako zdroj světla se nejčastěji používá halogenová nebo xenonová výbojka, protože její spektrum záření se nejvíce podobá spektru slunečního záření. Na zkoumaný solární článek dopadá kolmo homogenní svazek rovnoběžných paprsků, který je vytvořen pomocí optických systémů. Výstupem FLASH testu jsou tzv. flash data, která jsou určena výstupním špičkovým výkonem, napětím naprázdno, proudem na krátko, pracovním napětím, proudem a výkonem, případně účinností nebo i hodnotou fill faktoru. Panely jsou testovány za podmínek STC (Standardní zkušební podmínky dle ČSN CLC/TS 61836, IEC 60904-9) – intenzita 1000 W/m^2 , AM 1,5 a teplota $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [17].

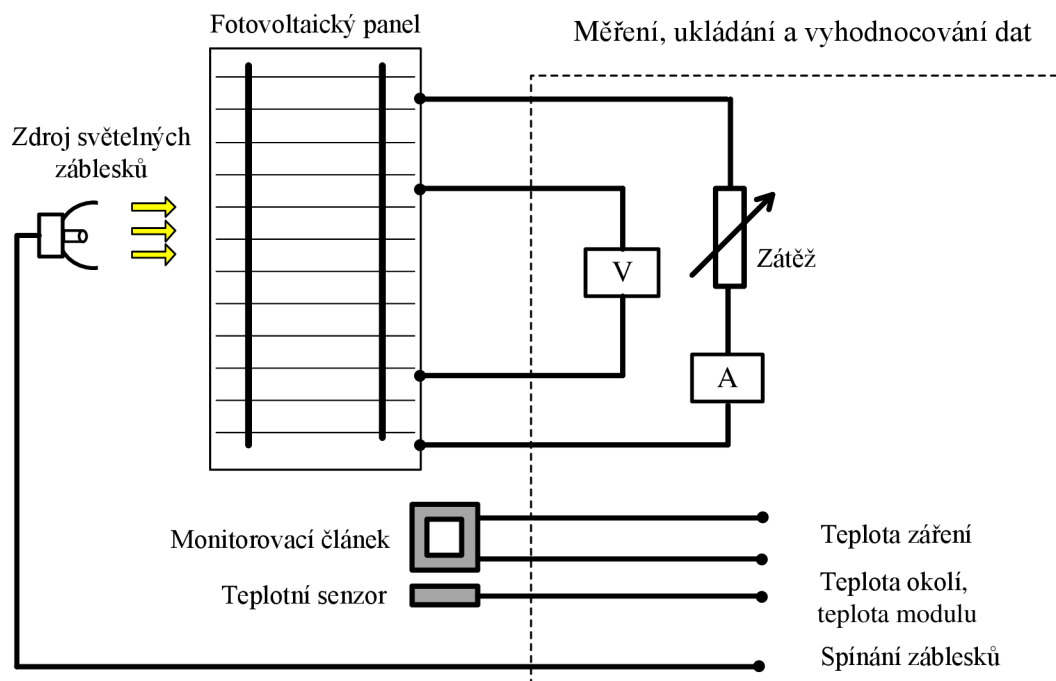
FLASH tester se skládá z několika částí, které budou níže popsány.

- **Zdroj světelného záblesku (flasher)** – generuje přesně kalibrovaný impuls světla. Jako zdroj světla se nejčastěji používá xenonová výbojka. Aby byla zajištěna co nejnižší spotřeba elektrické energie a zahřívání testovaného panelu, provádí se měření v pulzním módu. Zdrojem světla mohou být buď jedno pulzní SLP (single pulse), kde záblesk trvá 10 až 100 ms, během kterých se vykreslí celá A–V charakteristika, nebo více pulzní MLP (multiple pulse), kde jeden záblesk trvá 1 ms a pro kompletní A–V charakteristiku je nutné 100 záblesků, tedy 100 bodů A–V charakteristiky. V současné době se více využívají zdroje

SLP.

- **Elektronická zátěž** – snímá reakci fotovoltaického modulu během světelného impulsu na úplnou A–V křivku. Zátěž se reguluje automaticky na základě prvotní kalibrace dle referenčního modulu.
- **Monitorovací článek** – zajišťuje nutnou korekci pro optimální světelné ozáření.
- **Senzor pro měření teplot** – je součástí měřicího systému, nebo jako samostatný snímač.
- **PC pro výpočet a ukládání naměřených dat** – zpracovává velké množství naměřených dat, tj. číselných hodnot intenzity světelného záření, elektrického proudu a elektrického napětí. Všechny tyto veličiny jsou měřicím zařízením získávány současně.

Na Obr. 4.3 je znázorněno blokové schéma FLASH testu. Pro určení sériového odporu fotovoltaického panelu dle standardu IEC zachycují simulátory obvykle dvě různé úrovně záření během jediného záblesku [17].



Obr. 4.3: Blokové schéma metody FLASH testu [17]

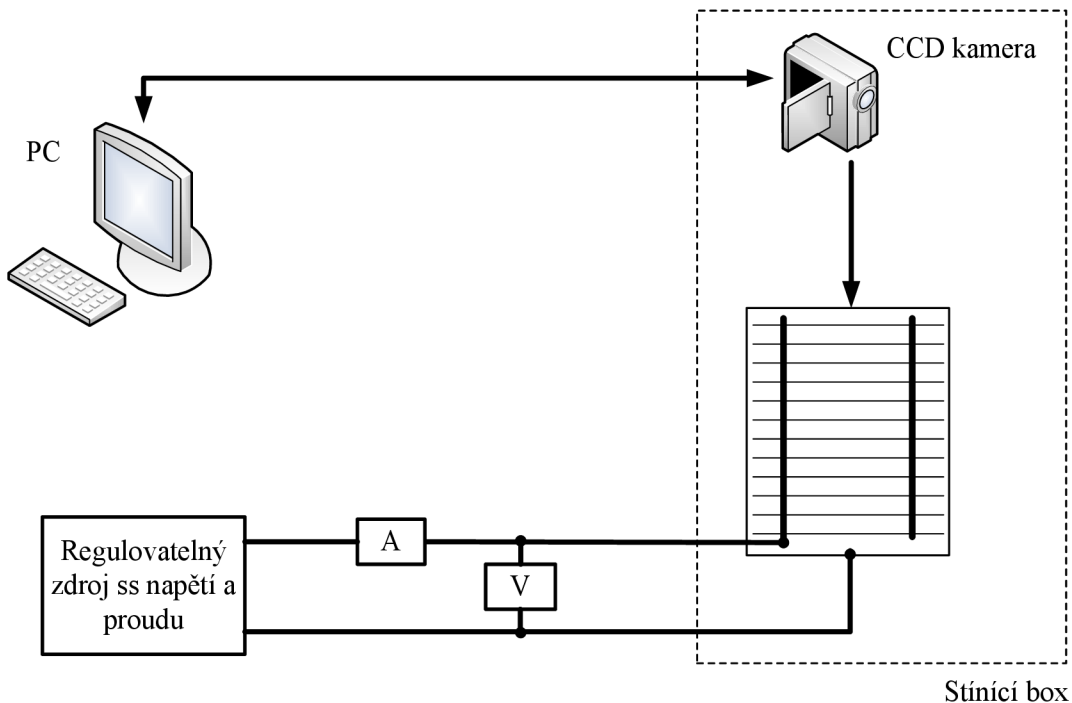
4.2.2 Elektroluminiscence

Elektroluminiscence je jev, při kterém dochází k přeměně elektrické energie na světelnou energii. Přeměna nastává při průchodu elektrického proudu luminoforem, případně fotovoltaickým článkem zapojeným v propustném směru, kdy se aktivuje P–N přechod a dojde ke světelné emisi díky zářivé rekombinaci křemíku. Defekty jsou jasně viditelné a nevyžadují světlo. Vyzářené fotony jsou snímány CCD kamerou, která využívá převážně šedou stupnici zobrazení. Finální obraz je pak poskládán ze světlejších a tmavších míst, kde světlejší místa prezentují vyšší proudovou hustotu, což zpravidla bývají místa, kde je fotovoltaický článek spojen s kontaktem, tmavá místa naopak ukazují na poruchu ve struktuře článku. Při zanedbání opakovaného využití fotonů, můžeme říct že měření fotonového proudu přímo souvisí s lokálním rozdělením kvazi Fermiho hladin $E_{Fn} - E_{Fp}$ a vychází tak ze vztahu [18]:

$$\phi_{EL} \propto \int_0^W U_{rad} dz = \int_0^W Bpn_- dz = n_i^2 \int_0^W B \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_b T}\right) dz, \quad (4.1)$$

kde w je tloušťka článku [10].

Na Obr. 4.4 je znázorněno blokové schéma elektroluminiscence. Výsledné zobrazení umožňuje vizuálně rozlišit jednotlivé defekty a určit jejich příčinu [10].



Obr. 4.4: Blokové schéma metody Elektroluminiscence [10]

4.2.3 Měření FV panelu v klimatické komoře

Testování fotovoltaických panelů v klimatické komoře probíhá za podmínek specifikovaných normou ČSN EN61215. Tato mezinárodní norma stanovuje požadavky IEC pro posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu pozemních fotovoltaických modulů vhodných pro dlouhodobý provoz v mírných venkovních klimatických podmínkách, definovaných v IEC 60721-2-1. Platí pouze pro typy modulů z krystalického křemíku. Účelem prováděné řady zkoušek je pak určit elektrické a tepelné vlastnosti modulu a ukázat pokud možno přijatelnými peněžními i časovými náklady, že modul je schopen vydržet prodlouženou expozici v klimatech popsáných normou. Skutečná pravděpodobná délka technického života takto hodnocených modulů bude záviset na jejich konstrukci, prostředí a podmínkách v nichž pracují [19].

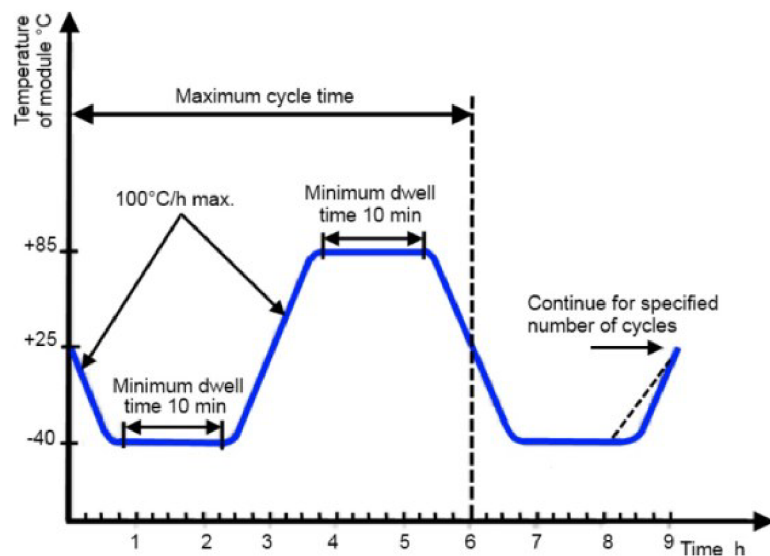
Teplotní cyklování TCT(Thermal Cycling Test)

Test teplotního cyklování TCT určuje schopnost části panelu odolávat extrémně nízkým a extrémně vysokým teplotám a přechodu mezi nimi, dále zkoumá schopnost odolávat cyklické expozici při těchto extrémních teplotách.

Jelikož vystavení panelu extrémním teplotám způsobuje urychlení únavy materiálů, dochází ke vzniku mechanických defektů, jako jsou lomy, defekty způsobené pnutím materiálu apod.

Během 200 tepelných cyklů testu by proud měl být nastaven v rozsahu $\pm 2\%$ od změřeného max. výkonu při STC. Proud může být zachován pouze při teplotě panelu nad 25°C . V průběhu 50 termálních cyklů protékající proud není potřeba.

Panel se v teplotní komoře testuje v rozmezí teplot $-40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ až $+85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ viz teplotní profil na Obr. 4.5 Rychlost změny teploty panelu mezi teplotními extrémy nesmí překročit hranici $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$, panel musí být v každém z extrémů min. 10 min. Doba jednoho cyklu nesmí překročit 6 h. Fotovoltaický panel je podroben 50 úplným cyklům, dle profilu na obr. a po skončení celé řady cyklů se srovnávají parametry panelu před testem a po testu [19].

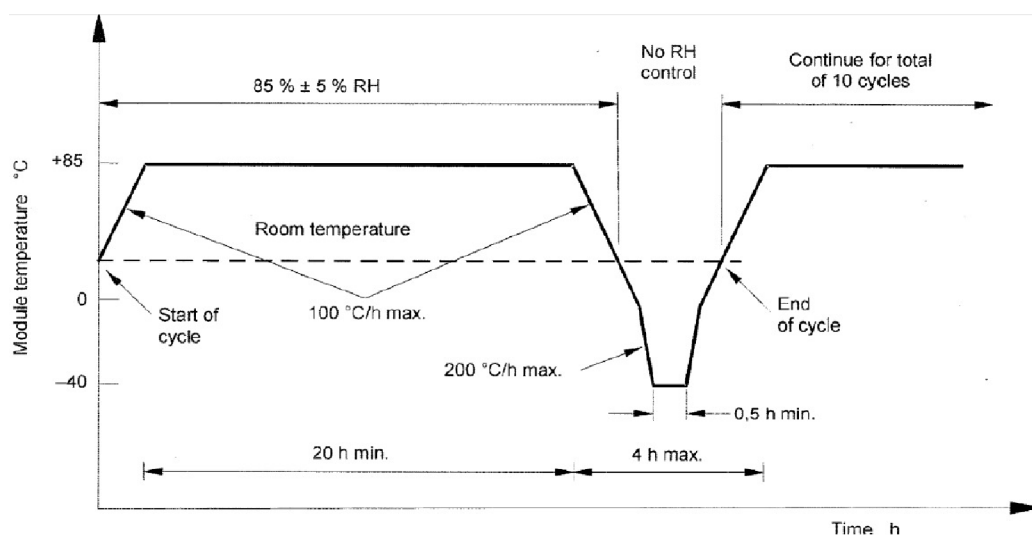


Obr. 4.5: Grafický průběh teplotního cyklování [19]

Test mrznoucí vlhkostí HF (Humidity-Freeze Test)

Účelem Humidity-Freeze testu je určit odolnost fotovoltaického panelu účinkům vysokých a nízkých teplot až pod bodem mrazu v kombinaci s vlhkostí prostředí. Na rozdíl od Thermal cycling testu nezkoumá Humidity-Freeze test panel prostřednictvím tepelných šoků.

Panel je testován v 10 úplných cyklech viz profil na Obr.4.6 . Maximální a minimální teploty musí být v rozmezí $\pm 2^\circ\text{C}$ z uvedených úrovní a relativní vlhkost se musí udržovat v rozsahu $\pm 5\%$ stanovené hodnoty při všech teplotách vyšších, než je pokojová teplota. Po skončení řady 10 úplných cyklů se srovnávají hodnoty parametrů panelu získaných před testem a po testu [19].



Obr. 4.6: Grafický průběh testu mrznoucí vlhkostí [19]

5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ FV PANELŮ

Praktické měření fotovoltaických panelů se skládalo z měření panelů pomocí metody elektroluminiscence, měření V–A charakteristik panelů pomocí analyzátoru PROVA 210 od společnosti Micronix, proměření panelů na FLASH Testeru PASAN a měření panelů pomocí termovizní kamery. K měření byly použito 5 fotovoltaických panelů různého stáří, rozměru a s různými parametry. Dva z panelů byly vyrobeny z monokrystalického křemíku, jeden panel z polykrystalu křemíku a jeden panel z amorfního křemíku. Měřené fotovoltaické panely jsou uvedeny v Tab. 5.1.

Výrobce	Typ	Technologie výroby článku	Identifikační číslo
Solartec	STR 36–50	Monokrystalický	501104
Rich Solar	RS-M185	Monokrystalický	2009111412441
Microsol	MM0225–G	Monokrystalický	3311154048
Solartec	Neznámý	Polykrystalický	12056
Neznámý	Neznámý	Amorfní	Neznámé

Tab. 5.1: Přehled měřených fotovoltaických panelů

Všechny panely jsou sledovány již po několik let, proto jsou v diplomové práci využity ke srovnání výsledky z předchozích měření. Panely byly po dobu sledování zapojeny do experimentální FVE (Fotovoltaická elektrárna) na střeše budovy VUT v Brně, aby se co nejlépe simuloval jejich reálný provoz, dále byly používány v rámci výuky. Monokrystalický panel Microsol MM0225–G s identifikačním číslem 3311154056 byl v rámci sledování degradace panelů odeslán do společnosti Solartec s.r.o., kde se podrobil testům v klimatické komoře. Název a typ panelu z amorfního křemíku nemůže být z důvodu firemního tajemství uveden, jedná se však o panel, který je v reálném provozu součástí fotoelektrické elektrárny. Naměřené hodnoty parametrů jednotlivých panelů a srovnání jejich změn vlivem degradace v čase jsou uvedeny v následující části diplomové práce.

5.1 Parametry měřených panelů

5.1.1 Solartec STR 36–50

Fotovoltaický panel od společnosti Solartec typ STR 36–50 se skládá z 36 monokryсталických článků. Panel je součástí laboratorních úloh pro výuku předmětů zabývajících se obnovitelnými a alternativními zdroji energie. Na Obr. 5.1 je fotografie panelu a zadního štítku s jednotlivými parametry modulu. Hodnoty jednotlivých parametrů jsou pak vypsány do Tab. 5.2.



Obr. 5.1: Fotografie panelu Solartec STR 36-50 a štítku panelu s jeho parametry

Parametr	Hodnota
P_{\max}	50 Wp
U_{mpp}	17,4 V
I_{mpp}	2.98 A
U_{oc}	21,5 V
I_{sc}	3,27 A

Tab. 5.2: Parametry panelu Solartec STR 36-50

5.1.2 Rich Solar RS-M185

Fotovoltaický panel od firmy Rich Solar typ RS-M185 je z měřených panelů nejnovější. Panel je složen ze 72 monokrystalických článků. Na Obr. 5.2 je fotografie panelu a zadního štítku s jednotlivými parametry modulu. Hodnoty jednotlivých parametrů jsou pak vypsány do Tab. 5.3.



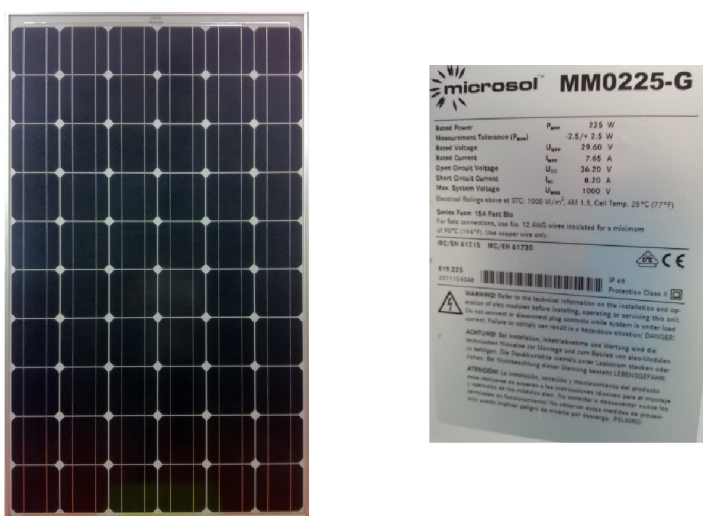
Obr. 5.2: Fotografie panelu Rich Solar RS-M185 a štítku panelu s jeho parametry

Parametr	Hodnota
P_{\max}	185 Wp
U_{mpp}	36,4 V
I_{mpp}	5,08 A
U_{oc}	44,6 V
I_{sc}	5,68 A
EFF	14,5 %

Tab. 5.3: Parametry panelu Rich Solar RS-M185

5.1.3 Microsol MM0225–G

Fotovoltaický panel Microsol MM0225–G je složen ze 60 monokrystalických článků. Tento panel byl jako jediný z panelů poslán do společnosti Solartec, kde prošel degračními testy v klimatické komoře. Panel absolvoval 50 cyklů Thermal Cycling Test a 10 cyklů Humidity-Freeze Test. Míra degradace panelu a změna parametrů je uvedena v další kapitole diplomové práce. Na Obr. 5.3 je fotografie panelu a zadního štítku s jednotlivými parametry modulu. Hodnoty jednotlivých parametrů jsou pak vypsány do Tab. 5.4.



Obr. 5.3: Fotografie panelu Microsol MM0225–G a štítku panelu s jeho parametry

Parametr	Hodnota
P_{max}	225 Wp
U_{mpp}	29,6 V
I_{mpp}	7,65 A
U_{oc}	36,2 V
I_{sc}	8,2 A

Tab. 5.4: Parametry panelu Microsol MM0225–G

5.1.4 Panel Solartec z polykrystalického křemíku

Fotovoltaický panel Solartec č. 12056 neznámého typu je složen ze 36 polykrystalických článků. Tento panel je ze všech měřených panelů nejstaršího data výroby. Vzhledem k nečitelnému štítku nebylo možné určit typ a parametry panelu. Na Obr. 5.4 je fotografie panelu a zadního štítku s jednotlivými parametry modulu.



Obr. 5.4: Fotografie panelu Solartec z polykrystalického křemíku

5.1.5 Panel z amorfního křemíku

Pro testování parametrů panelů z amorfního křemíku byly k dispozici dva stejné FV panely. Jeden z panelů ještě nebyl aktivně využíván, druhý testovaný panel byl v provozu fotovoltaické elektrárny a tudíž byl vystaven klimatickým podmínkám. Vzhledem k firemnímu tajemství nemůže být uvedena společnost, která panel vyrobila, typ panelu, parametry ani datasheet modulu. Na Obr. 5.5 je fotografie panelu.



Obr. 5.5: Fotografie panelu z amorfního křemíku

5.2 Měření V–A charakteristiky pomocí analyzátoru PROVA 210

5.2.1 Popis metody

Měření V–A charakteristik panelů probíhalo pomocí analyzátoru PROVA 210 od společnosti Micronix a softwarového programu Solar Module Analyzer 12A. Během měření byl analyzátor připojen k PC prostřednictvím rozhraní USB, na svorky analyzátoru byly postupně připojovány všechny měřené panely. V programu Solar Modul Analyzer 12A byly poté nastaveny příslušné parametry měření. Naměřená data byla vyexportována a následně z nich byly sestrojeny grafické průběhy. Jelikož měření probíhalo ve venkovním prostředí, nemohly být zaručeny shodné podmínky pro všechna testování tj. stejná venkovní teplota a teplota panelů, relativní vlhkost, intenzita dopadajícího záření, apod.

Panely byly pomocí analyzátoru testovány v roce 2012 a 2013. V období mezi měřeními byly panely zatíženy tak, aby se co nejvíce simuloval skutečný provoz panelů ve fotovoltaických elektrárnách.

Při jednotlivých měření byla různá intenzita dopadajícího záření. Intenzita byla změřena pomocí pyranometru viz Obr. 5.6 . Naměřené hodnoty byly pomocí programu Microsoft Excel přepočítány na hodnoty při intenzitě dopadajícího záření 1000 W/m^2 .

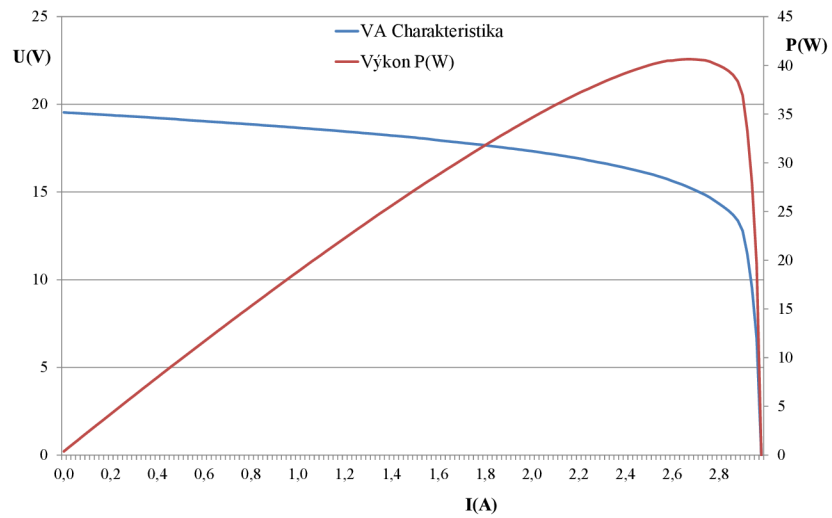


Obr. 5.6: Měření intenzity dopadajícího záření pomocí pyranometru

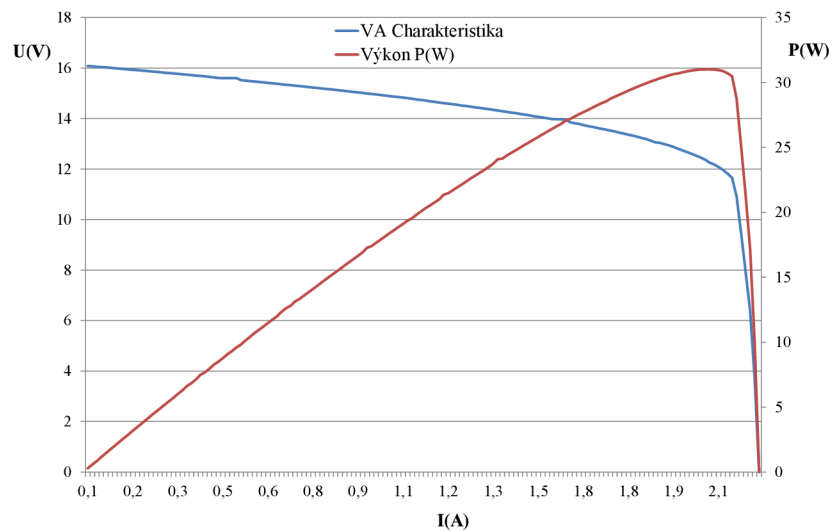
5.2.2 Naměřené výsledky

Solartec STR36-50

Jako první byl testován panel Solartec STR 36–50 č. 501104 viz Obr. 5.7 a Obr. 5.8 . Měření metodou elektroluminiscence poukázalo na značné poškození článků panelu, a proto byl naměřený maximální výkon v roce 2012 40,63 Wp při teplotě 39,4 °C a v roce 2013 pouze 31,02 Wp při teplotě 33,6 °C oproti výkonu udávanému výrobcem 50 Wp.



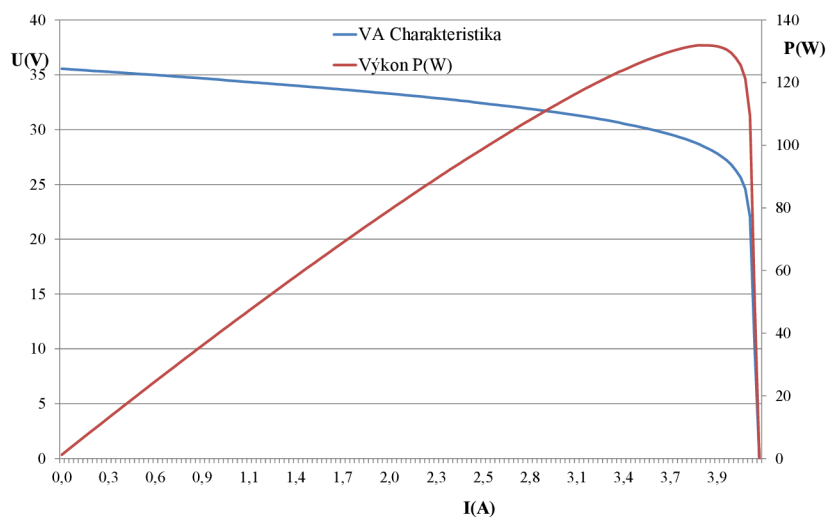
Obr. 5.7: V–A charakteristika fotovoltaického panelu Solartec STR 36–50 č. 501104 měřená v roce 2012 při teplotě 39,4 °C



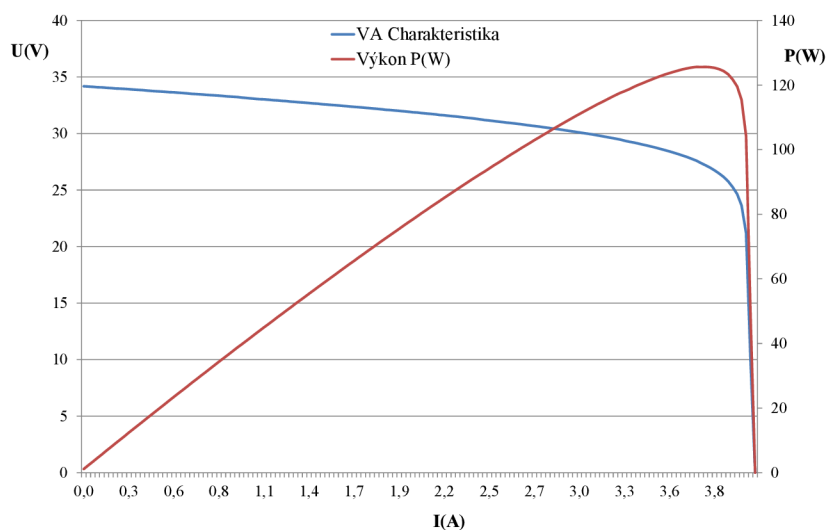
Obr. 5.8: V–A charakteristika fotovoltaického panelu Solartec STR 36–50 č. 501104 měřená v roce 2013 při teplotě 33,6 °C

Rich Solar RS-M185

U panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 viz Obr. 5.9 a Obr. 5.10 byl naměřený maximální výkon v roce 2012 131,92 Wp při teplotě 39,7 °C a v roce 2013 pouze 125,64 Wp při teplotě 34,2 °C oproti výkonu udávanému výrobcem 185 Wp.



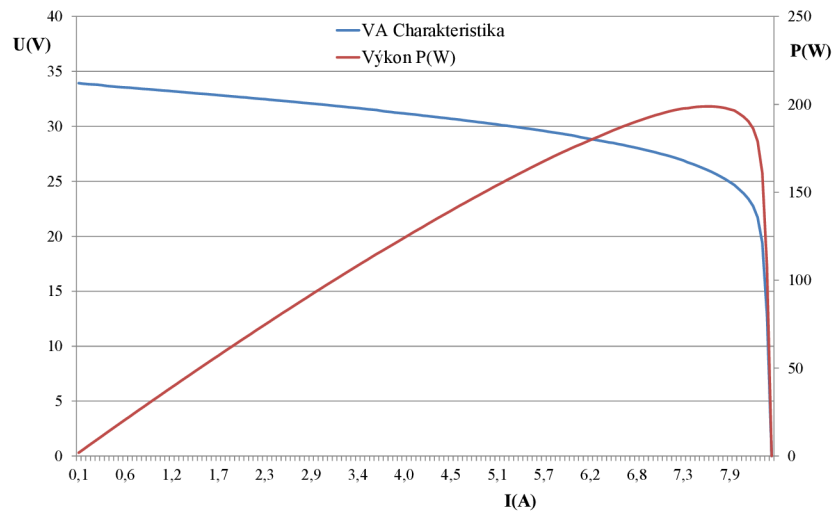
Obr. 5.9: V–A charakteristika fotovoltaického panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřená v roce 2012 při teplotě 39,7 °C



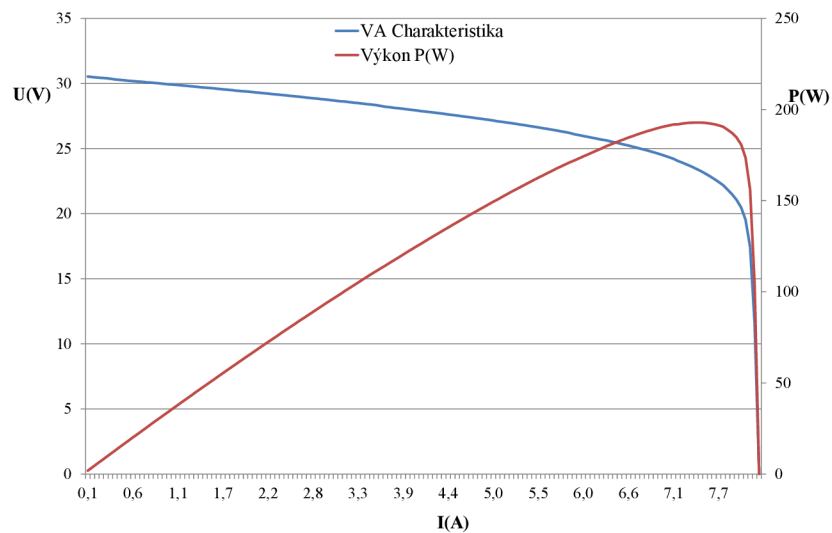
Obr. 5.10: V–A charakteristika fotovoltaického panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřená v roce 2013 při teplotě 34,2 °C

Microsol MM0225–G

Panel Microsol MM0225–G č. 3311154048 vykazoval v roce 2012 výkon 198,95 Wp při teplotě 39,3 °C viz V–A charakteristika na Obr. 5.11 . V roce 2013 prošel modul degradačními testy v klimatické komoře, které zapříčinily snížení naměřeného výkonu na hodnotu 192,85 Wp viz Obr. 5.12 při teplotě 33,8 °C . Maximální výkon udávaný výrobcem je 225 Wp.



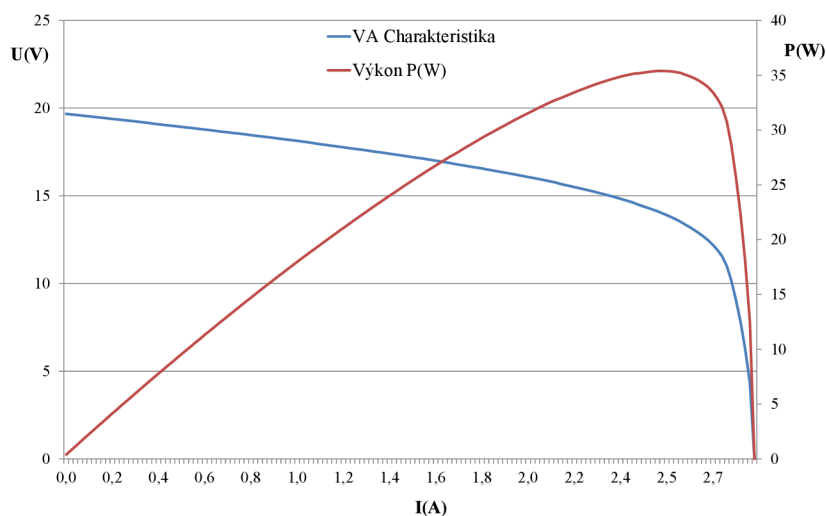
Obr. 5.11: V–A charakteristika fotovoltaického panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048 měřená v roce 2012 při teplotě 39,3 °C



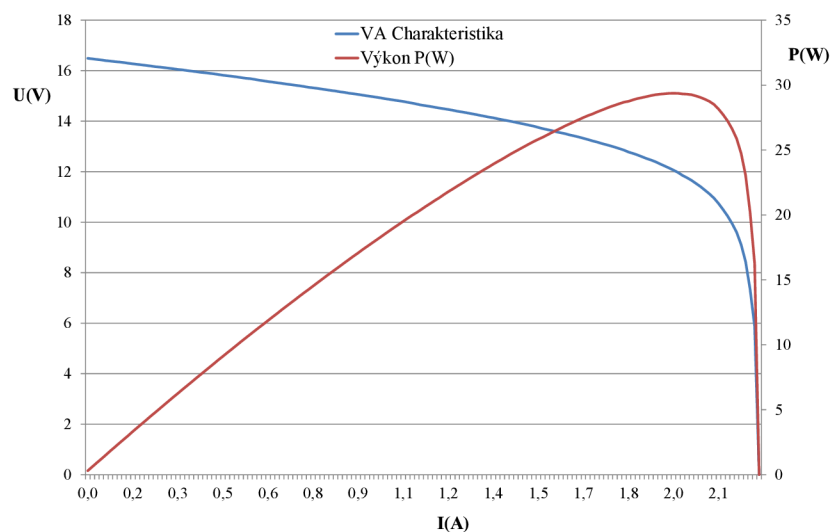
Obr. 5.12: V–A charakteristika fotovoltaického panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048 měřená v roce 2013 při teplotě 33,8 °C

Panel Solartec z polykrystalického křemíku

Posledním testovaným panelem byl panel Solartec vyrobený z polykrystalického křemíku. Jelikož na panelu již nebyl výrobní štítek, nebylo možné srovnat naměřené hodnoty s hodnotami udávanými výrobcem. Naměřený výkon panelu byl v roce 2012 35,39 Wp při teplotě panelu 37,6 °C a v roce 2013 29,37 Wp při teplotě 33,6 °C. V–A charakteristiky panelu jsou na Obr. 5.13 a Obr. 5.14 .



Obr. 5.13: V–A charakteristika panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřená v roce 2012 při teplotě 37,6 °C



Obr. 5.14: V–A charakteristika panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřená v roce 2013 při teplotě 34,5 °C

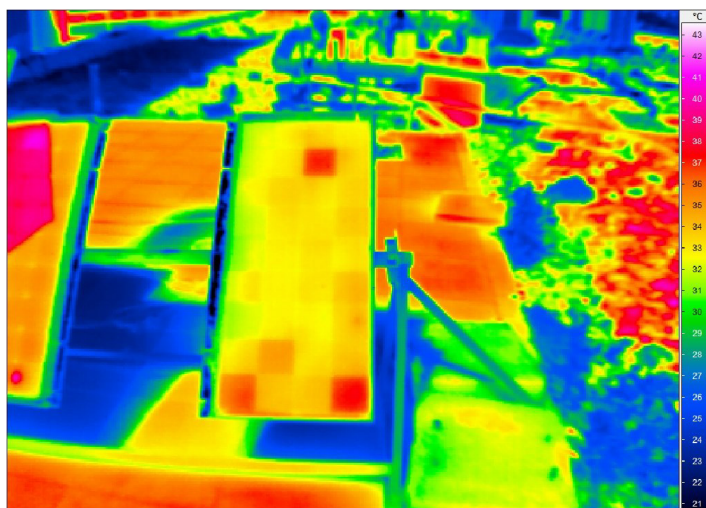
5.3 Měření panelů termovizní kamerou

Termovize fotovoltaických panelů byla měřena pomocí termovizní kamery VarioCam HR viz Obr. 5.15 VarioCam je termografický systém pro měření dlouhovlnného infračerveného spektra (7,5 – 14 μ m). Pomocí čočky je přenášen obraz na detektor o rozlišení 640 x 480 px. Elektrický signál je dále zpracován zabudovaným elektronickým systémem [16].

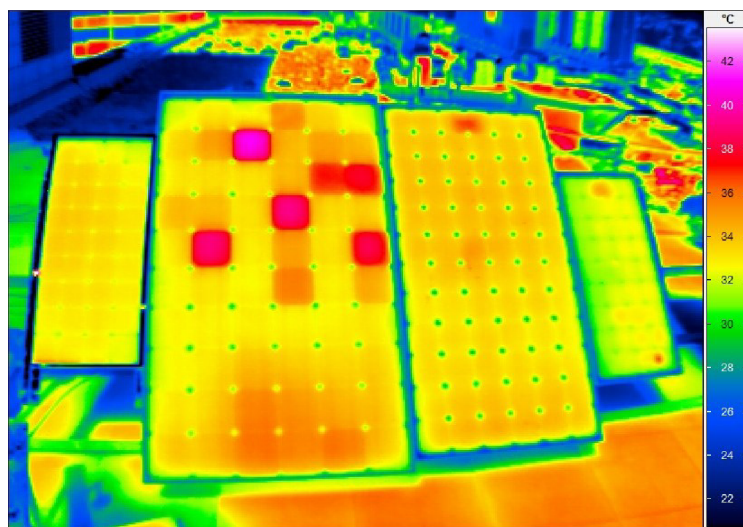


Obr. 5.15: Termovizní kamera VarioCam HR [16]

Termovizní diagnostika byla prováděna z přední strany panelu a na pořízených snímcích viz Obr. 5.16 a Obr. 5.17 jsou patrná horká místa tzv. hot spots, která vznikají v místech defektů krystalické mřížky fotovoltaických článků. Jelikož se fotovoltaické články v těchto místech přehřívají, může dojít až k destrukci celého FV panelu.



Obr. 5.16: Termovizní diagnostika FV panelů snímek 1



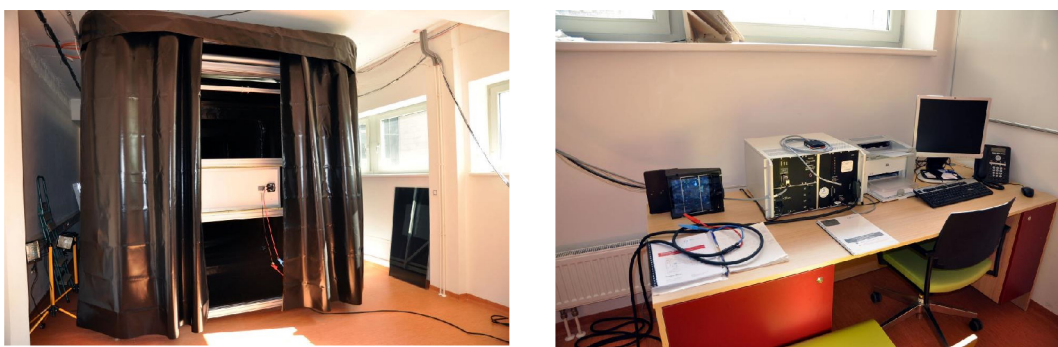
Obr. 5.17: Termovizní diagnostika FV panelů snímek 2

5.4 Měření V–A charakteristiky pomocí FLASH testu

5.4.1 Popis metody

Měření V–A charakteristik pomocí FLASH testu probíhá za standardizovaných podmínek měření STC a umožňuje tedy spolehlivě určit míru vlivu zjištěných defektů na výkon experimentálních panelů.

Testování FV panelů spočívá v umístění modulů do upevňovacího zařízení, následně dojde zatemnění tunelu pomocí závěsů. Po spuštění měření se nejprve nabije zdroj napájení xenonové výbojky a poté výbojka vyše záblesk. Panel je připojený k měřicímu zařízení a po jeho expozici se vygenerují naměřené hodnoty. Z takto získaných hodnot se sestaví V–A charakteristiky. Na Obr. 5.18 je zobrazen panel v upevňovacím zařízení a měřící pracoviště FLASH testeru.



Obr. 5.18: Měřící pracoviště FLASH testeru

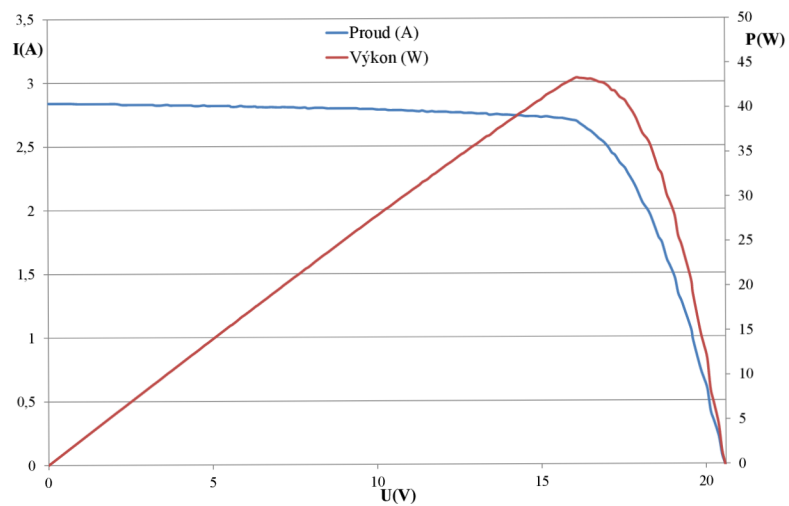
Měření z roku 2010 bylo prováděno na specializovaném pracovišti pro testování FV panelů na ČVUT v Praze. V roce 2012 byl FLASH tester nainstalován i do prostor VUT v Brně, a tak další testování panelů probíhalo v nově vzniklé fotovoltaické laboratoři PVLab Brno. Tester v této laboratoři byl od společnosti PASAN, třída všech parametrů A+.

Celkem bylo testováno 5 fotovoltaických panelů za podmínek STC, tedy při hodnotě dopadajícího záření 1000 W/m^2 a při teplotě v prostředí $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Na rozdíl od metody měření V–A charakteristik pomocí analyzátoru PROVA 210 jsou pro všechna měření klimatické podmínky stejné, tudíž naměřené hodnoty opravdu vypovídají o stavu FV panelu.

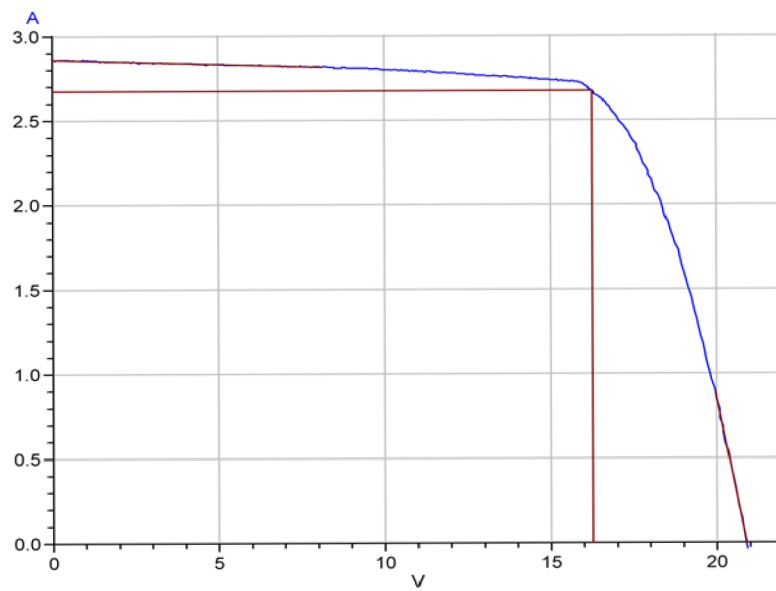
5.4.2 Naměřené výsledky

Solartec STR 36-50

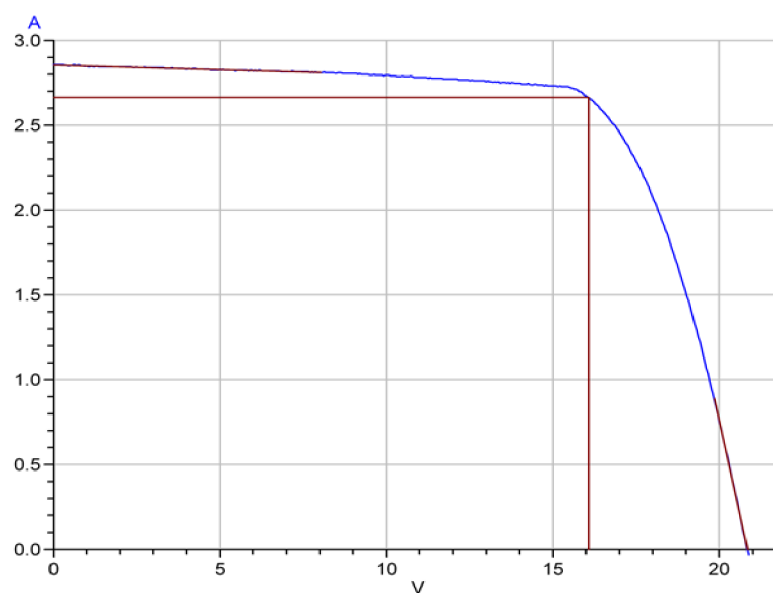
Testovaný panel Solartec STR 36-50 č. 501104 má dle výrobce výkon až 50Wp. Reálný výkon panelu byl v roce 2010 43,31 Wp viz Obr. 5.19 , po dvou letech provozu panelu klesl výkon na 42,86 Wp viz Obr. 5.20 poté byl panel vystaven degradačním účinkům dopadajícího záření a klimatických podmínek. V současné době má panel výkon 42,36 Wp viz Obr. 5.21 .



Obr. 5.19: FLASH test panelu Solartec STR 36–50 č. 501104 měřený v roce 2010



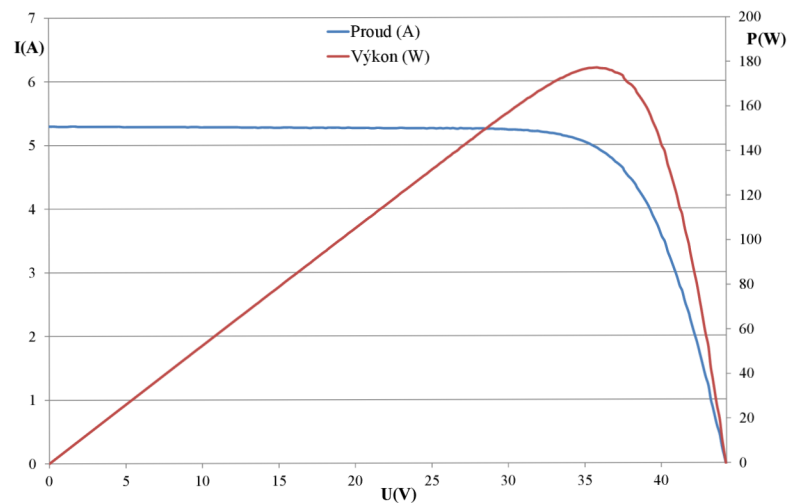
Obr. 5.20: FLASH test panelu Solartec STR 36–50 č. 501104 měřený v roce 2012



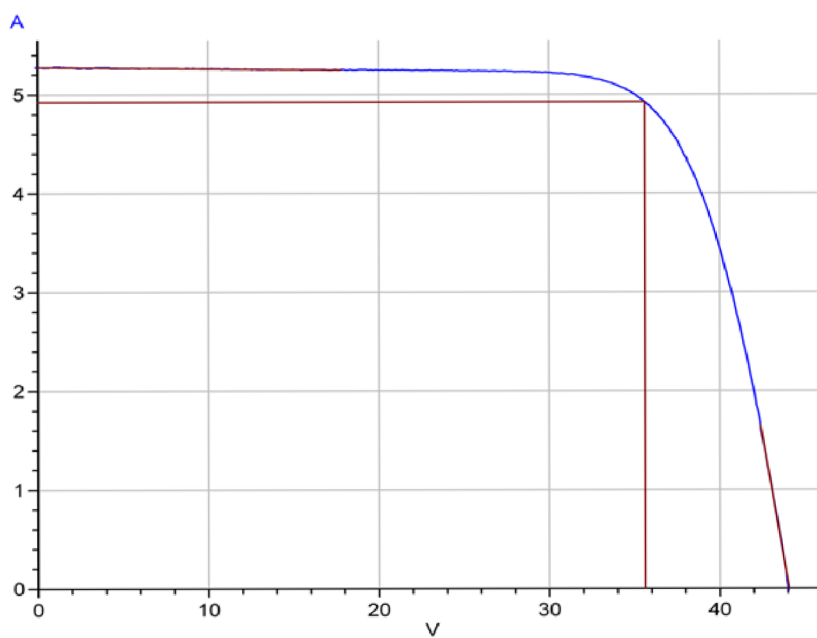
Obr. 5.21: FLASH test panelu Solartec STR 36–50 č. 501104 měřený v roce 2013

Rich Solar RS-M185

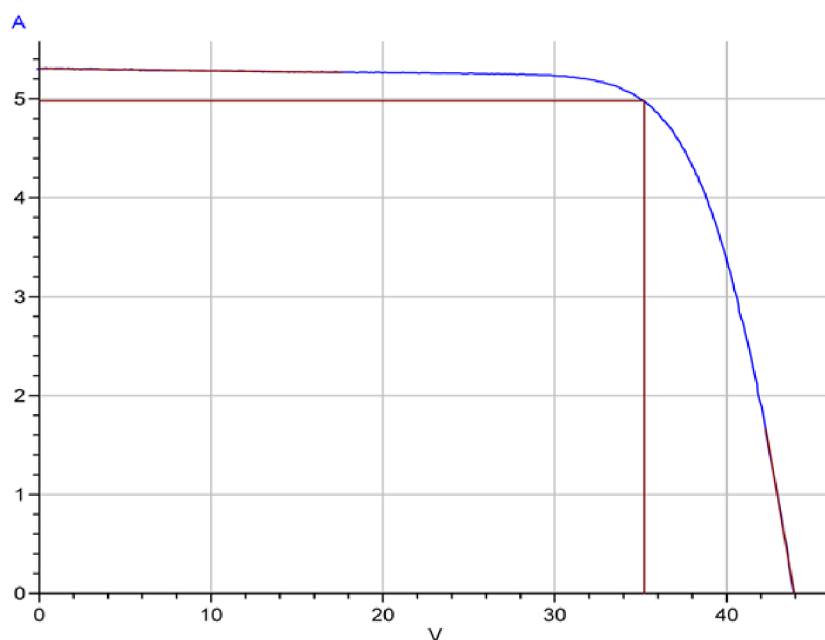
U testovaného panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 byl v roce 2010, kdy byl panel téměř nový změřen výkon 177,35 Wp, tedy o 7,6 Wp méně, než je výkon udávaný výrobcem. V roce 2012 byl změřený výkon 175,46 Wp a v roce 2013 175,28 Wp. Pokles výkonu byl způsoben degradací panelu při jeho dlouhodobém zatížení. Naměřené V–A charakteristiky jsou na Obr. 5.22 , Obr. 5.23 a Obr. 5.24 .



Obr. 5.22: FLASH test panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřený v roce 2010



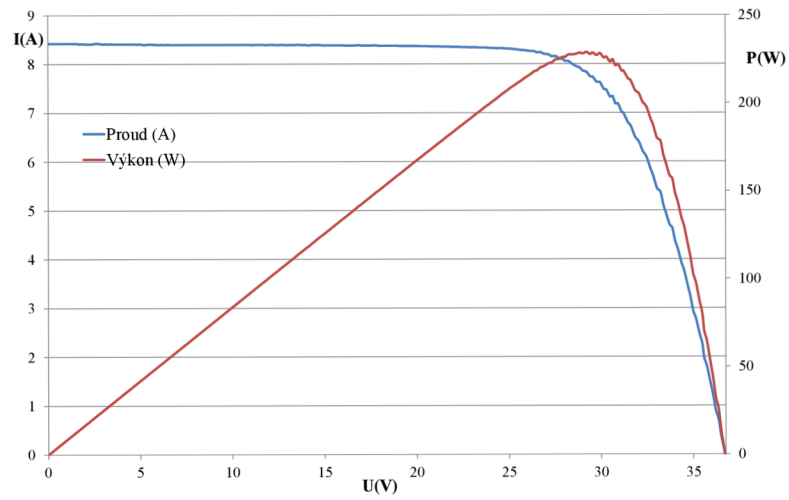
Obr. 5.23: FLASH test panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřený v roce 2012



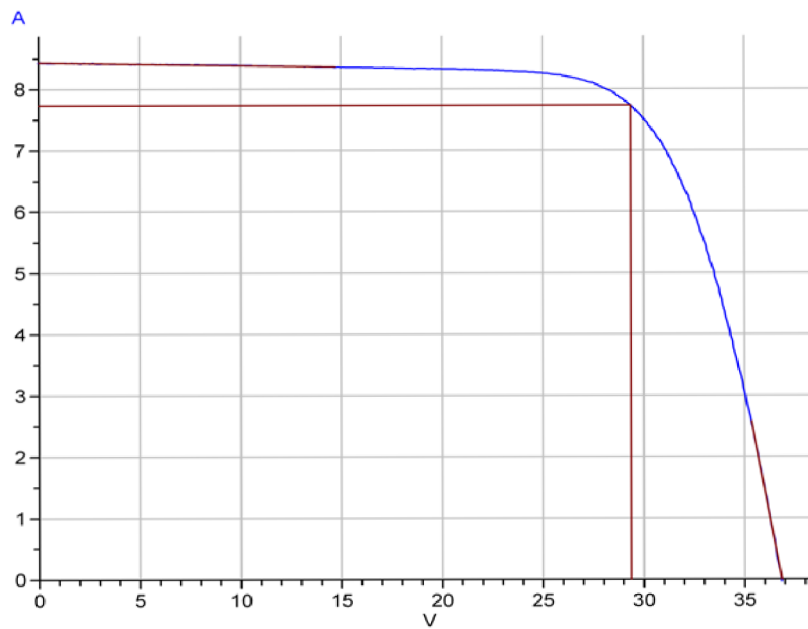
Obr. 5.24: FLASH test panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřený v roce 2013

Microsol MM0225–G

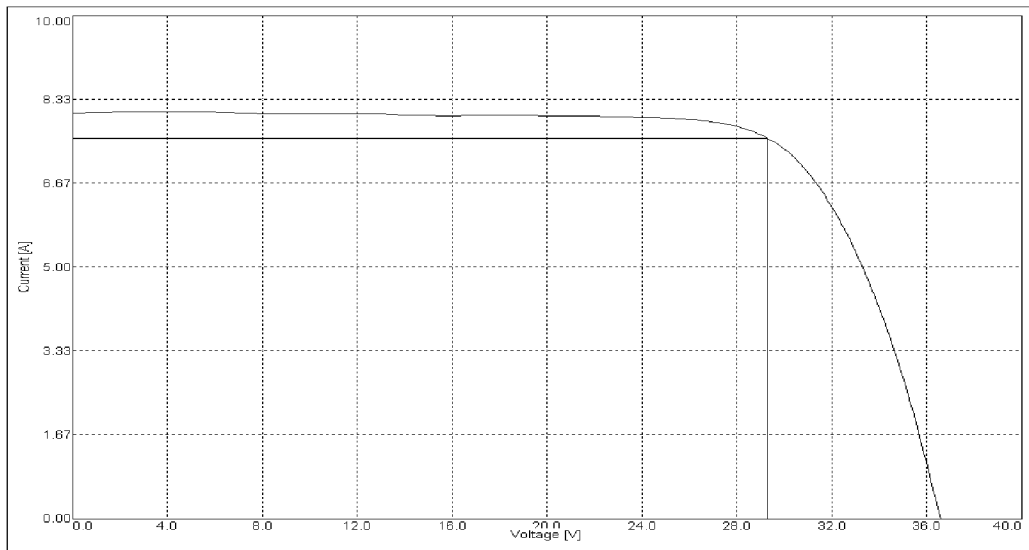
Testovaný panel Microsol MM0225–G č. 3311154048 byl v roce 2010 jeden z nejnovějších modulů, které byly testovány. Tehdy byl naměřený výkon 228,86 Wp viz Obr. 5.25 , tedy dokonce vyšší než výkon udávaný výrobcem 225 Wp. V roce 2012 měl výkon panelu hodnotu 228,46 Wp viz Obr. 5.26 . V roce 2013 byl modul podroben degradačním testům v klimatické komoře. Nejdříve byl testován prostřednictvím Thermal Cycling Test v rámci 50 cyklů. Výkon po tomto degradačním testu klesl na hodnotu 218,87 Wp, poté byl ještě testován Humidity-Freeze Test po dobu 10 cyklů, což znamenalo další degradaci panelu a pokles výkonu na 215,26 Wp. V–A charakteristiky panelu po degradačních testech Thermal Cycling Test a Humidity-Freeze Test je na Obr. 5.27 a Obr. 5.28 . Charakteristiky byly změřené ve specializovaném pracovišti společnosti Solartec.



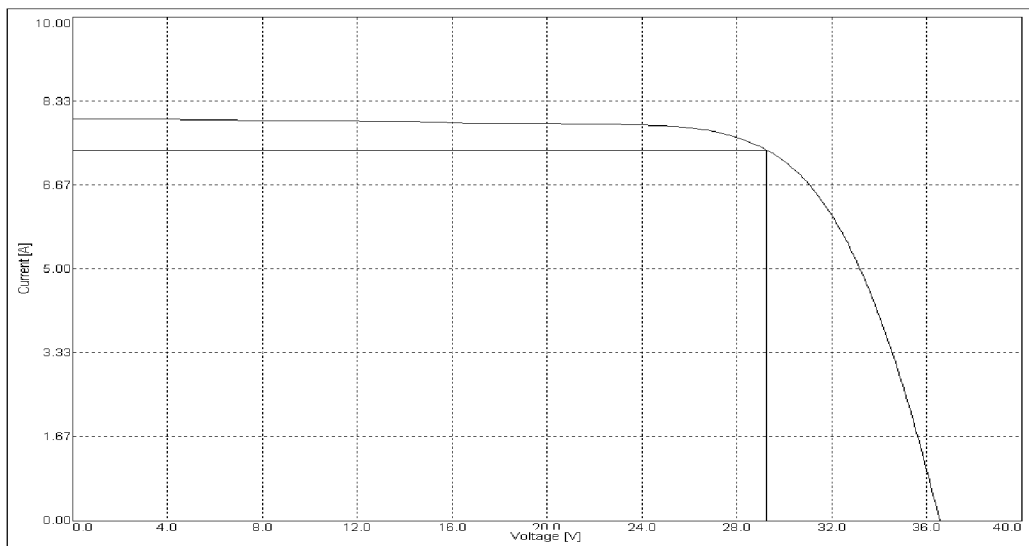
Obr. 5.25: FLASH test panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048 měřený v roce 2010



Obr. 5.26: FLASH test panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048 měřený v roce 2012



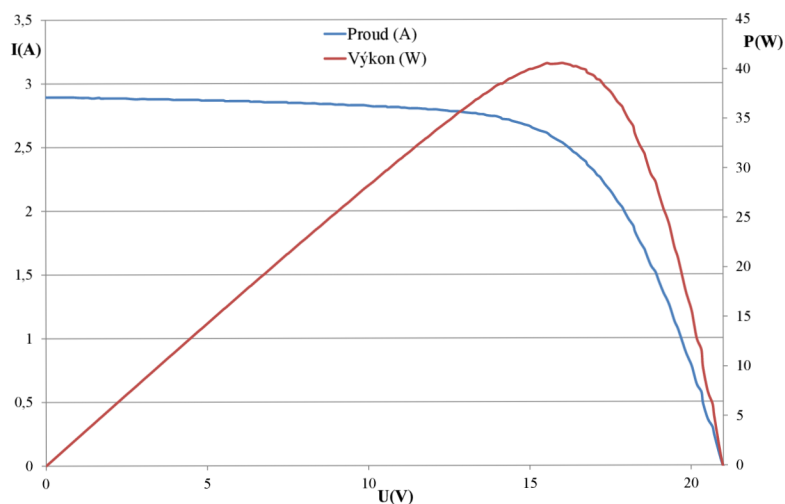
Obr. 5.27: FLASH test panelu Microsol MM0225-G č. 3311154048 po 50 cyklech Thermal Cycling Test



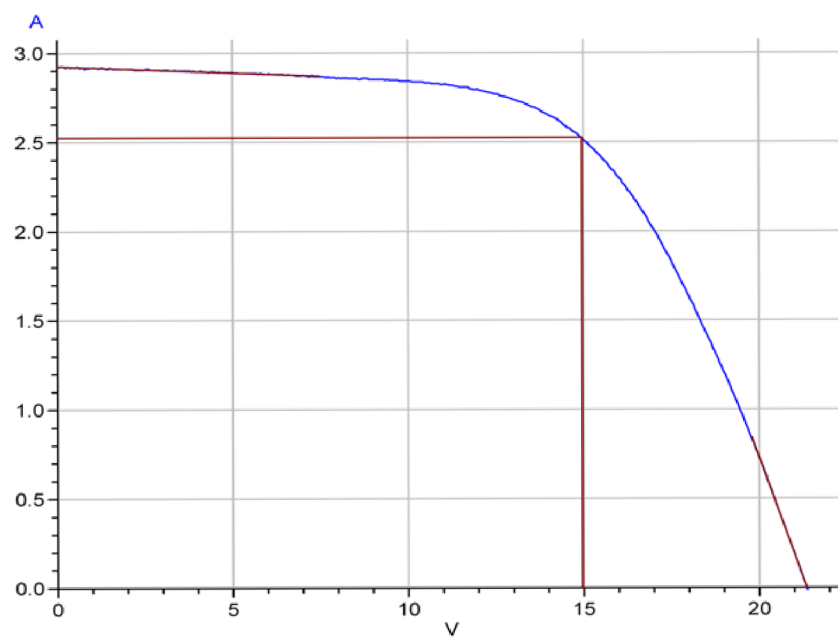
Obr. 5.28: FLASH test panelu Microsol MM0225-G č. 3311154048 po 10 cyklech Humidity-Freeze Test

Panel Solartec z polykrystalického křemíku

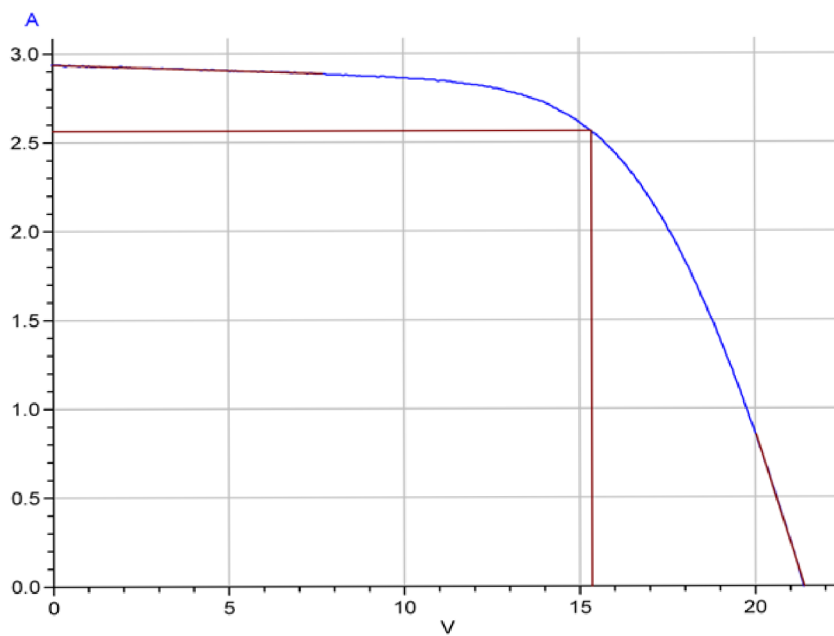
Měřený panel vyrobený z polykrystalu křemíku od společnosti Solartec měl bohužel nečitelný výrobní štítek, tudíž nebylo možné zjistit typ panelu, ani jeho parametry včetně výkonu udávaného výrobcem. V roce 2010 byl na panelu naměřen výkon 40,59 Wp. V roce 2012 byl výkon panelu 39,37 Wp a v roce 2013 měl hodnotu 37,77 Wp. Naměřené V–A charakteristiky pro jednotlivé roky jsou na Obr. 5.29 , Obr. 5.30 a Obr. 5.31 .



Obr. 5.29: FLASH test panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřený v roce 2010



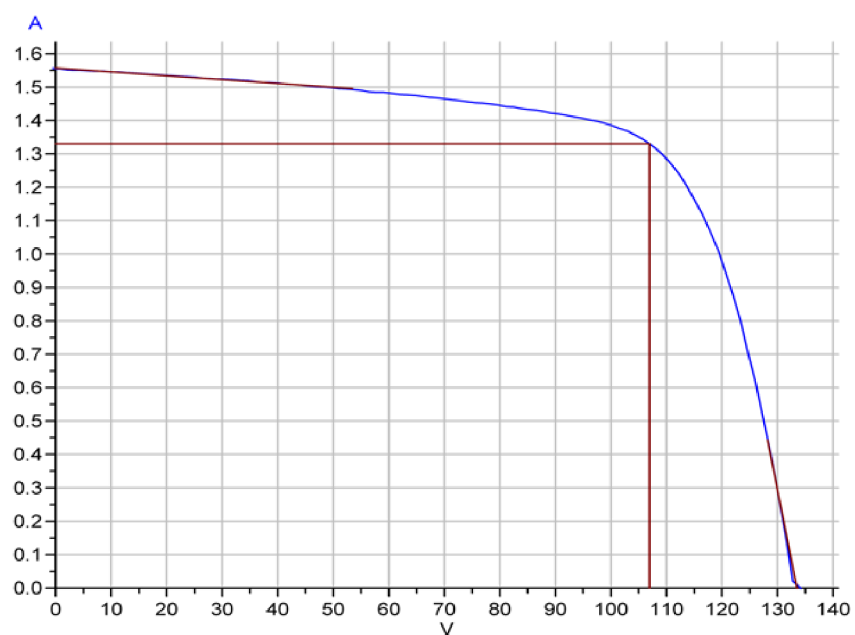
Obr. 5.30: FLASH test panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřený v roce 2012



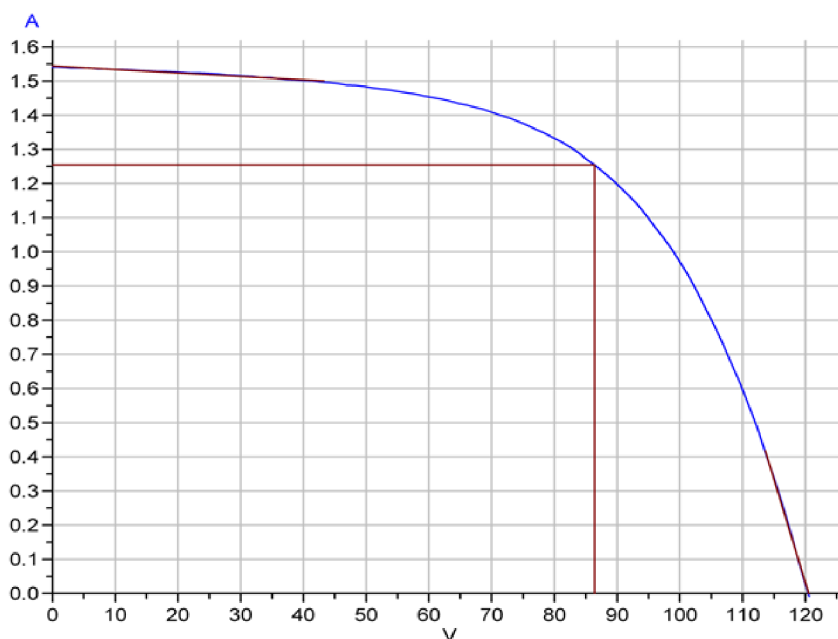
Obr. 5.31: FLASH test panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřený v roce 2013

Panel z amorfního křemíku

Pomocí metody FLASH testu byly testovány dva shodné panely, z nichž jeden nebyl téměř zatížený provozními podmínkami a druhý panel byl součástí fotovoltaické elektrárny, kde byl vystaven klimatickým podmínkám a degradačním vlivům. Používaný panel byl testován po 2 letech provozu. Naměřený výkon nevytíženého panelu byl 142,27 Wp a vytíženého panelu 108,39 Wp. V–A charakteristika nevytíženého panelu je na Obr. 5.32 , vytíženého panelu na Obr. 5.33 .



Obr. 5.32: FLASH test nevytíženého amorfního panelu



Obr. 5.33: FLASH test amorfního panelu po 2 letech v provozu

5.5 Měření pomocí elektroluminiscence

5.5.1 Popis metody

Měření probíhalo v temné místnosti, kde byl panel napájen regulovatelným zdrojem stejnosměrného napětí a proudu a obraz luminiscenčního odrazu byl snímán CCD kamerou G2-3200 od firmy Moravské přístroje s použitým čipem typu 3,2 MPx CCD Kodak KAF-3200ME viz zapojení na Obr. 4.4 . Spektrální citlivost čipu je v rozmezí 370–830 nm při 50 %. Čip snímá obraz o maximálních rozměrech 2184 x 1472 pixelů. S kamerou je používán objektiv Canon Zoom Lens EF 28–80 mm s ohniskovou vzdáleností 43 cm viz Na Obr. 5.34 [20].

Tato kamera se vyznačuje nízkým teplotním šumem a nastavitelnou dobou uzávěrky na libovolně dlouhou dobu. Nízký šum čipu společně s možností dlouhé expoziční doby je zajištěn pomocí efektivního dvoustupňového chlazení s Peltierovými články. Tyto články dokáží udržet čip hluboce zmrazený, maximálně na teplotu 45 °C pod okolní teplotou. Při měření byl používán čip při teplotě –20 °C. Měření probíhalo po dobu 240 s [20].

Komunikace s PC je zajištěna ovládacím programem SIMS (Simple Image Manipulation System), jenž je dodáváný společně s kamerou. Program vyhodnocuje teplotu CCD čipu a lze ji pomocí něj konfigurovat. Chlazení na požadovanou teplotu –

20 °C trvalo přibližně 10 minut. Nasnímané snímky lze pak vyexportovat v požadovaném formátu.



a)

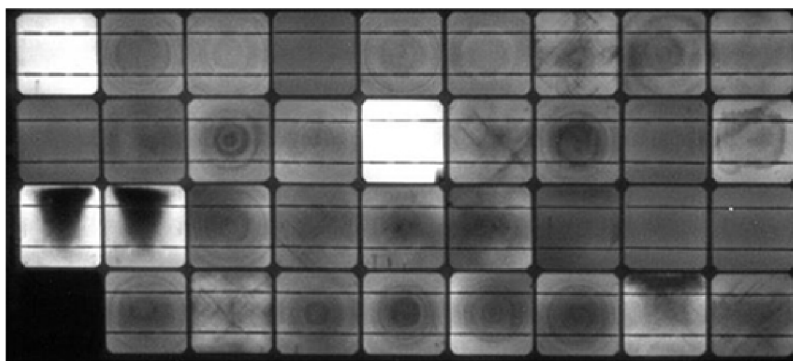


b)

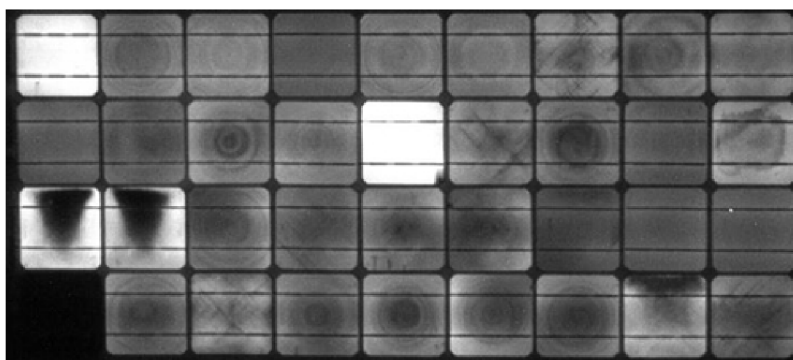
Obr. 5.34: a) CCD kamera s objektivem b) pracoviště pro měření elektroluminiscence

Solartec STR 36-50

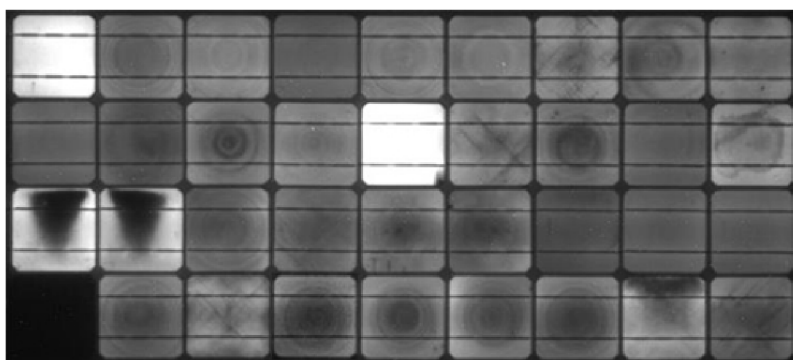
První z měřených panelů je panel z monokrystalického křemíku od společnosti Solartec typ STR36-50. Je zde patrné, že řada článků modulu je poškozena. Články vykazují vírové defekty, defekty způsobené vnitřním pnutí a skrytými zlomy. Viditelná jsou i mechanická poškození ve formě čar na jednotlivých článcích vzniklá při jejich montáži. Článek v dolním levém rohu je patrně úplně nefunkční z důvodu procesního defektu, jež vznikl zřejmě špatným nakontaktováním. Z hlediska účinnosti lze konstatovat, že výkonnost panelu vlivem výrazného poškození FV článků je oproti teoretickým předpokladům výrazně nižší. Na Obr. 5.35 je zobrazena elektroluminiscence z roku 2010, na Obr. 5.36 z roku 2012 a na Obr. 5.37 z roku 2013. Při srovnání jednotlivých článků a jejich defektů je patrné, že deformace článků se s postupem času zvětšuje a tudíž výkon panelu s časem klesá.



Obr. 5.35: Elektroluminiscence panelu Solartec STR 36–50 č. měřená v roce 2010 501104 při 22,2 V a 2,5 A

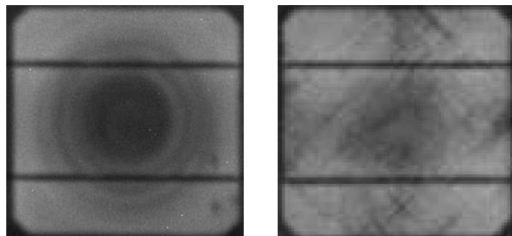


Obr. 5.36: Elektroluminiscence panelu Solartec STR 36–50 č. 501104 měřená v roce 2012 při 22,8 V a 2,5 A



Obr. 5.37: Elektroluminiscence panelu Solartec STR 36–50 č. 501104 měřená v roce 2013 při 22,4 V a 2,5 A

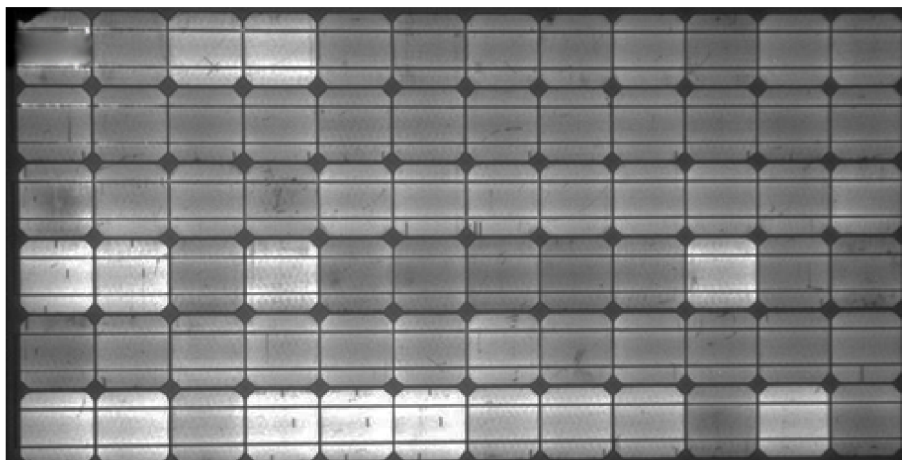
Na Obr. 5.38 je detail některých defektů článků panelu Solartec, konkrétně vírový defekt a vnitřní pnutí.



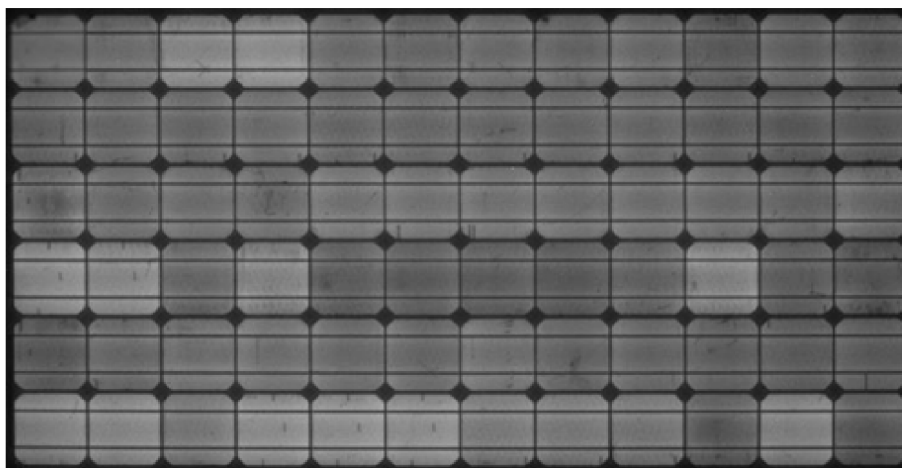
Obr. 5.38: Detail vírového efektu a pnutí článku panelu Solartec STR 36–50 č. 501104

Rich Solar RS-M185

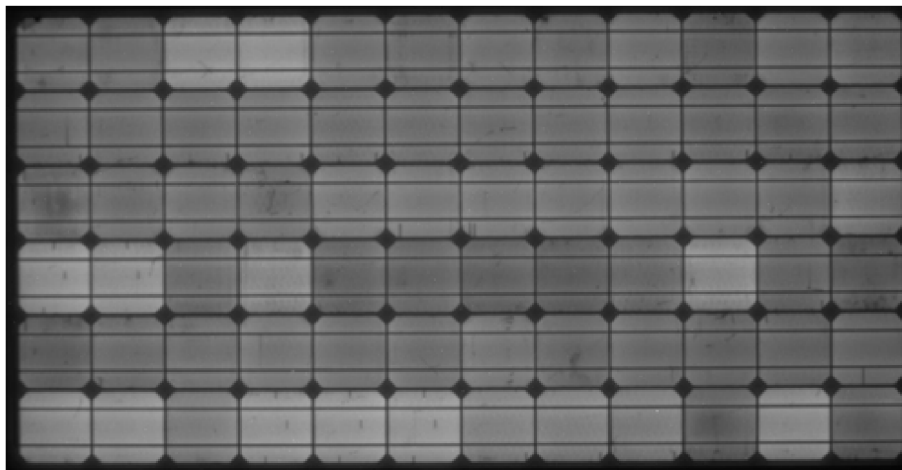
U fotovoltaického panelu Rich Solar RS-M185 jsou fotovoltaické články zapojeny do dvou paralelních větví, při měření elektroluminiscence muselo být tedy na zdroji nastaveno vyšší napětí cca okolo 45 V. Článek panelu vlevo nahoře má ulomený roh, jinak má panel minimum vadných článků, a lze tedy konstatovat, že tyto vady významně neovlivňují parametry panelu. Na Obr. 5.39 je zobrazena elektroluminiscence z roku 2010, na Obr. 5.40 z roku 2012 a na Obr. 5.41 z roku 2013. Při srovnání jednotlivých článků a jejich defektů je patrné, že se v průběhu let téměř nedeformovaly, pouze u některých článků se vlivem času snížila svítivost.



Obr. 5.39: Elektroluminiscence panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřená v roce 2010 při 46,3 V a 3 A

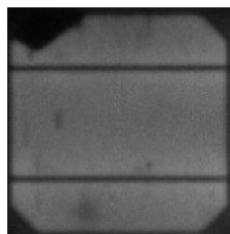


Obr. 5.40: Elektroluminiscence panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřená v roce 2012 při 45,7 V a 3 A



Obr. 5.41: Elektroluminiscence panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 měřená v roce 2013 při 45,4 V a 3 A

Na Obr. 5.42 je detail defektního článku panelu Rich Solar.

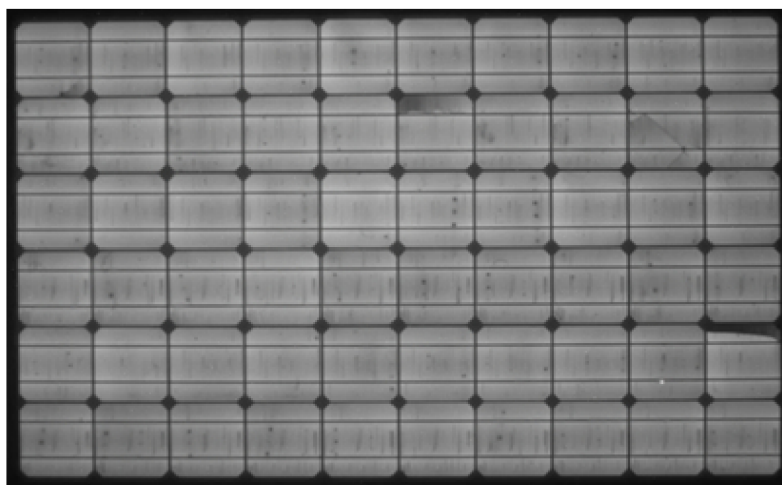


Obr. 5.42: Detail ulomeného rohu článku panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441

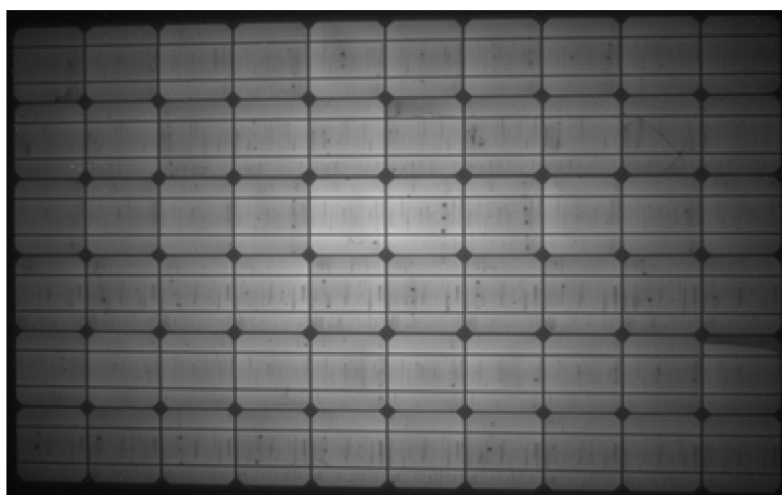
Microsol MM0225–G

Ze snímku panelu MM0225–G od společnosti Microsol s identifikačním číslem 3311154048 je zřejmé, že panel oproti monokrystalickému panelu od společnosti Solartec vykazuje podstatně méně defektů. Na některých článcích lze pozorovat defekty způsobené skrytými zlomy. Ostatní vady jsou důsledkem mechanického poškození při výrobním procesu samotného panelu a při jeho transportu z výroby. Toto mechanické poškození má za následek praskliny na článku, které je identifikováno viditelnými čarami. Jelikož je celý panel vodivý, nemají tyto vady na celkový výkon článku velký vliv. Na Obr. 5.43 je zobrazena elektroluminiscence z roku 2010, na Obr. 5.44 z roku 2012 a na Obr. 5.45 z roku 2013. Při srovnání jednotlivých článků

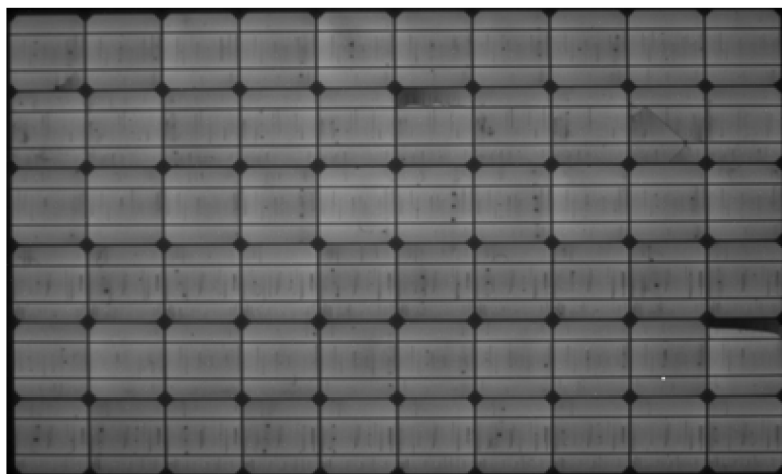
a jejich defektů je zřejmé, že deformace článků se s postupem času zvětšuje a tudíž výkon panelu s časem klesá.



Obr. 5.43: Elektroluminiscence panelu Microsol MM0225-G č. 3311154048 měřená v roce 2010 při 37,2 V a 3 A

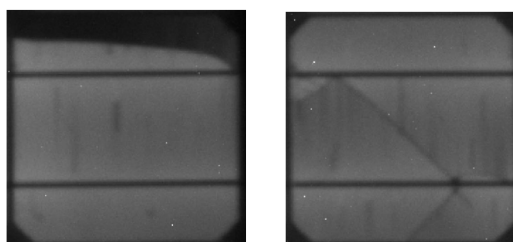


Obr. 5.44: Elektroluminiscence panelu Microsol MM0225-G č. 3311154048 měřená v roce 2012 při 36,5 V a 3 A



Obr. 5.45: Elektroluminiscence panelu Microsol MM0225-G č. 3311154048 měřená v roce 2013 po degračních testech v klimatické komoře, při 36,8 V a 3 A

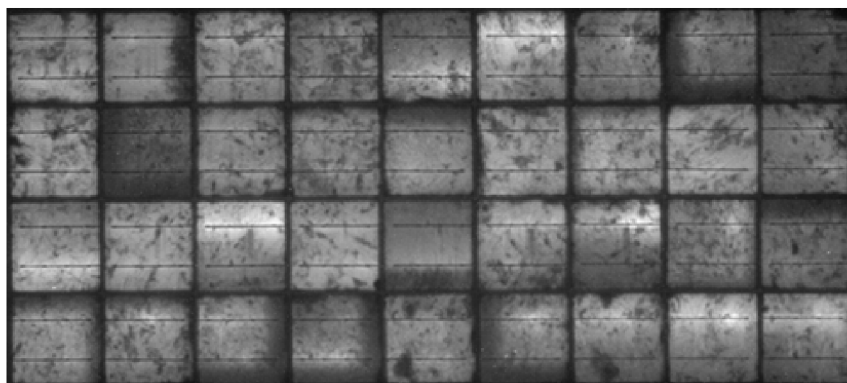
Na Obr. 5.46 je detail částečně nefunkčního článku, kde na tmavé části článku nedochází k rekombinaci a článek, na kterém je patrná prasklina.



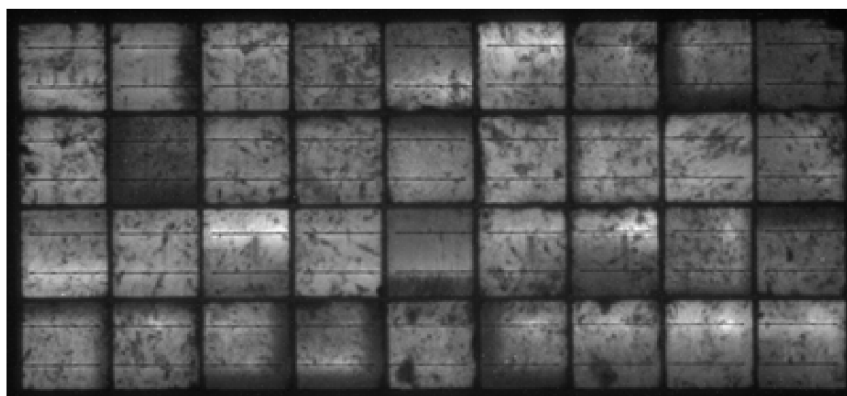
Obr. 5.46: Detail defektních článků panelu Microsol MM0225-G č. 3311154048

Panel Solartec z polykrystalického křemíku

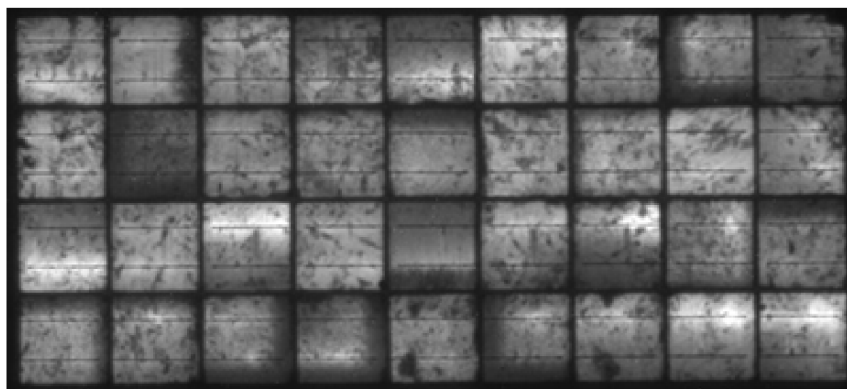
Měřený panel na Obr. 6.4 je vyrobený z polykrystalu křemíku a ze všech měřených panelů byl nejstaršího data výroby. Ze snímku je vidět, že některé články panelu již nefungují tak, jak mají. Dále jsou zde patrné některé defekty, jako jsou skryté zlomy a vnitřní pnutí. Na Obr. 5.47 je zobrazena elektroluminiscence z roku 2010, na Obr. 5.48 z roku 2012 a na Obr. 5.49 z roku 2013.



Obr. 5.47: Elektroluminiscence panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřená v roce 2010 při 24,4 V a 2,5 A



Obr. 5.48: Elektroluminiscence panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřená v roce 2012 při 24,0 V a 2,5 A



Obr. 5.49: Elektroluminiscence panelu Solartec č. 12056 z polykrystalického křemíku měřená v roce 2013 při 23,6 V a 2,5 A

5.6 Stárnutí a degradace FV panelů

Fotovoltaický panel je složen z různých materiálů, které podléhají procesu stárnutí a degradace vlivem dopadajícího záření a působení okolního prostředí. Samotný proces degradace závisí na několika faktorech jako např. množství nečistot a příměsí obsažených v daném materiálu, chemickém složení a struktuře materiálu, apod. Degradace materiálů je definována jako souhrn nevratných změn vlastností materiálu za daných podmínek [21].

Tyto nevratné změny mají zásadní vliv na účinnost fotovoltaických panelů, proto výrobci vždy udávají životnost svých produktů. Udávaná životnost např. pro panel Microsol MM0225–G je:

- za 10 let provozu pokles účinnosti na hodnotu 90 %,
- po 25 letech provozu pokles na nominální hodnoty účinnosti na 80 %.

Hodnoty získané při měření V–A charakteristik za standardizovaných měřících podmínek STC a snímky z měření metodou elektroluminiscence z let 2010, 2012 a 2013 byly použity ke zjištění míry degradace fotovoltaického panelu. Naměřené hodnoty byly dosazeny do rovnice rov. 5.1 :

$$degradace = \frac{P_{mppSTC1} - P_{mppSTC2}}{P_{mppSTC1}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

Solartec STR 36-50

U tohoto panelu je výkon udávaný výrobcem 50 Wp. Reálná hodnota výkonu však byla v roce 2010 pouze 43,31 Wp, v roce 2012 to byla hodnota 42,86 Wp a v roce

2013 měl panel výkon 42,36 Wp. Vzhledem ke stáří panelu a četným defektům na fotovoltaických článcích lze konstatovat, že je poměrně stabilní, což dokazuje i hodnota jeho účinnosti, která byla v roce 2010 9,54 %, v roce 2012 měla hodnotu 9,48 % a při měření v roce 2013 to bylo 9,32 %. Jelikož účinnost panelu v průběhu třech let klesla pouze o 0,22 %, je zřejmé, že degradační mechanismy neměly na parametry modulu výrazný vliv. Porovnání elektrických parametrů panelu je uvedeno v Tab. 5.5.

	Parametry v roce 2010	Parametry v roce 2012	Parametry v roce 2013
P_{mpp}	43,31 Wp	42,86 Wp	42,36 Wp
U_{mpp}	16,08 V	16,05 V	16,02 V
I_{mpp}	2,69 A	2,67 A	2,64 A
U_{oc}	20,57 V	20,56 V	20,55 V
I_{sc}	2,84 A	2,82 A	2,79 A
EFF	9,54%	9,48 %	9,32 %

Tab. 5.5: Srovnání parametrů panelu Solartec STR 36-50 č. 501104

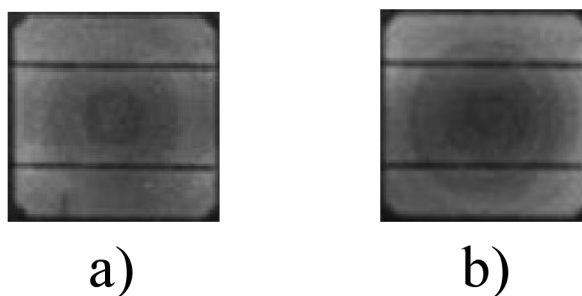
Míra degradace panelu Solartec STR 36-50 č. 501104 byla určena pomocí vztahu rov. 5.2 a rov. 5.3 :

$$degradace = \frac{P_{mppSTC1} - P_{mppSTC2}}{P_{mppSTC1}} \cdot 100 = \frac{43,31 - 42,86}{43,31} \cdot 100 = 1,04 \%, \quad (5.2)$$

$$degradace = \frac{P_{mppSTC2} - P_{mppSTC3}}{P_{mppSTC2}} \cdot 100 = \frac{42,86 - 42,36}{42,86} \cdot 100 = 1,17 \%, \quad (5.3)$$

kde $P_{mppSTC1}$ je výkon panelu Solartec STR 36-50 č. 501104 naměřený v roce 2010, $P_{mppSTC2}$ je hodnota výkonu modulu v roce 2012 a $P_{mppSTC3}$ je hodnota v roce 2013.

Pomocí metody elektroluminiscence bylo zjištěno, že některé defekty článku se vlivem degradace a stárnutí zvětšily a jejich deformace se tak více prohloubila viz Obr. 5.50 .



Obr. 5.50: Zvětšení defektu článku panelu Solartec STR 36-50 č. 501104 vlivem degradace

Rich Solar RS-M185

Při prvním měření v roce 2010 měl výkon panelu hodnotu 177,35 Wp, roku 2012 to byla hodnota 175,46 Wp a v roce 2013 je to 175,28 Wp. Účinnost modulu byla roku 2010 13,90 %, ve 2012 pak 13,74 % a v roce 2013 13,73 %. Pokles účinnosti tak byl pouze 0,17 %, což dokazuje odolnost panelu proti degradačním mechanismům a stárnutí, které mělo na elektrické parametry panelu pouze malý vliv. Srovnání elektrických parametrů panelu je uvedeno v Tab. 5.6.

	Parametry v roce 2010	Parametry v roce 2012	Parametry v roce 2013
P_{mpp}	177,35 Wp	175,46 Wp	175,28 Wp
U_{mpp}	35,85V	35,63V	35,21 V
I_{mpp}	4,95 A	4,93 A	4,98 A
U_{oc}	44,21 V	44,06 V	43,93 V
I_{sc}	5,30 A	5,28 A	5,31 A
EFF	13,90%	13,74 %	13,73 %

Tab. 5.6: Srovnání parametrů panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441

Míra degradace panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 byla určena pomocí vztahu rov. 5.5 a rov. 5.7 :

$$degradace = \frac{P_{mppSTC1} - P_{mppSTC2}}{P_{mppSTC1}} \cdot 100 = \quad (5.4)$$

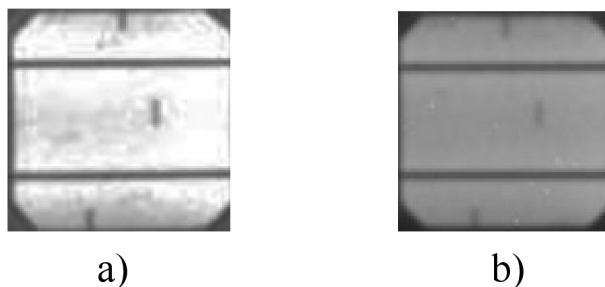
$$= \frac{177,35 - 175,46}{177,35} \cdot 100 = 1,07\%, \quad (5.5)$$

$$degradace = \frac{P_{mppSTC2} - P_{mppSTC3}}{P_{mppSTC2}} \cdot 100 = \quad (5.6)$$

$$= \frac{175,46 - 175,28}{175,46} \cdot 100 = 0,1\%, \quad (5.7)$$

kde $P_{mppSTC1}$ je výkon panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 naměřený v roce 2010, $P_{mppSTC2}$ je hodnota výkonu modulu v roce 2012 a $P_{mppSTC3}$ je hodnota v roce 2013.

Metodou elektroluminiscence nebyly zjištěny žádné nové defekty, pouze se u některých článků snížila vlivem degradace svítivost, což je zobrazeno na Obr. 5.51 .



Obr. 5.51: Snížení svítivosti článku panelu Rich Solar RS-M185 č. 2009111412441 vlivem degradace

Microsol MM0225–G

Jak již bylo zmíněno v praktickém měření panelu, modul Microsol MM0225–G jako jediný prošel degradačními testy v klimatické komoře. V roce 2010 byl výkon panelu 228,86 Wp, v roce 2012 před degradací měl naměřený výkon hodnotu 228,46 Wp a po degradačních testech klesl na hodnotu 215,26 Wp. Účinnost panelu klesla z hodnoty, jež byla v roce 2010 13,90% a v roce 2012 13,88% na hodnotu 13,10%. Snížený výkon a pokles účinnosti o 0,8%, je důsledek degradačních testů, které měly na elektrické parametry panelu zásadní vliv. Srovnání elektrických parametrů panelu je uvedeno v Tab. 5.7.

Míra degradace panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048 byla určena pomocí vztahu rov. 5.9 a rov. 5.11 :

	Parametry v roce 2010	Parametry v roce 2012	Parametry v roce 2013
P_{mpp}	228,86 Wp	228,46 Wp	215,26 Wp
U_{mpp}	29,23 V	29,37 V	29,27 V
I_{mpp}	7,83 A	7,73 A	7,36 A
U_{oc}	36,71 V	36,85 V	36,55 V
I_{sc}	8,42 A	8,44 A	7,97 A
EFF	13,90%	13,88 %	13,10 %

Tab. 5.7: Srovnání parametrů panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048

$$degradace = \frac{P_{mppSTC1} - P_{mppSTC2}}{P_{mppSTC1}} \cdot 100 = \quad (5.8)$$

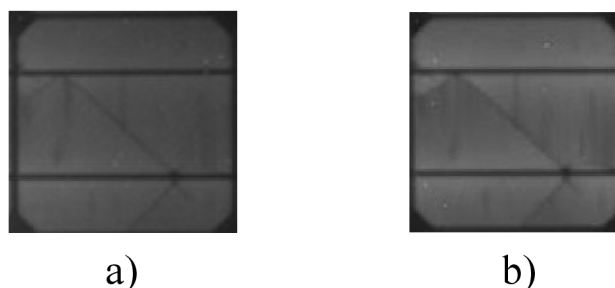
$$= \frac{228,86 - 228,46}{228,86} \cdot 100 = 0,17\%, \quad (5.9)$$

$$degradace = \frac{P_{mppSTC2} - P_{mppSTC3}}{P_{mppSTC2}} \cdot 100 = \quad (5.10)$$

$$= \frac{228,46 - 215,26}{228,46} \cdot 100 = 5,78\%, \quad (5.11)$$

kde $P_{mppSTC1}$ je výkon panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048 naměřený v roce 2010, $P_{mppSTC2}$ je hodnota výkonu modulu v roce 2012 a $P_{mppSTC3}$ je hodnota v roce 2013.

Na Obr. 5.52 je zobrazeno zvětšení defektu vlivem degradace, jež odhalilo měření metodou elektroluminiscence. Testy v klimatické komoře neměly na defekty článků výraznější vliv.



Obr. 5.52: Zvětšení defektu článku panelu Microsol MM0225–G č. 3311154048 vlivem degradace

Panel Solartec z polykrystalického křemíku

Panel z polykrystalických článků měl v roce 2010 výkon 40,59 Wp. V roce 2012 měl měřený výkon hodnotu 39,37 Wp a roku 2013 pak 37,77 Wp. Účinnost panelu byla v roce 2010 9,06 %, roku 2012 8,79 % a v roce 2013 měla hodnotu 8,44 %, pokles byl tedy o 0,62 %. Jelikož se jedná o nejstarší testovaný panel působení stárnutí a degračních mechanismů má na jeho parametry velký vliv a dle naměřených výsledků lze konstatovat, že došlo během posledních třech let k poměrně velkému snížení výkonu a účinnosti panelu. Srovnání elektrických parametrů panelu je uvedeno v Tab. 5.8.

	Parametry v roce 2010	Parametry v roce 2012	Parametry v roce 2013
P_{mpp}	40,59 Wp	39,37 Wp	37,77 Wp
U_{mpp}	16,02 V	15,36 V	14,96 V
I_{mpp}	2,53 A	2,56 A	2,52 A
U_{oc}	21,01 V	21,40 V	21,35 V
I_{sc}	2,90 A	2,94 A	2,92 A
EFF	9,06 %	8,79 %	8,44 %

Tab. 5.8: Srovnání parametrů panelu Solartec z polykrystalického křemíku

Míra degradace panelu Solartec z polykrystalického křemíku byla určena pomocí vztahu rov. 5.13 a rov. 5.15 :

$$degradace = \frac{P_{mppSTC1} - P_{mppSTC2}}{P_{mppSTC1}} \cdot 100 = \quad (5.12)$$

$$= \frac{40,59 - 39,37}{40,59} \cdot 100 = 3,01 \%, \quad (5.13)$$

$$degradace = \frac{P_{mppSTC2} - P_{mppSTC3}}{P_{mppSTC2}} \cdot 100 = \quad (5.14)$$

$$= \frac{39,37 - 37,77}{39,37} \cdot 100 = 4,06\%, \quad (5.15)$$

kde $P_{mppSTC1}$ je výkon panelu Solartec z polykrystalického křemíku naměřený v roce 2010, $P_{mppSTC2}$ je hodnota výkonu modulu v roce 2012 a $P_{mppSTC3}$ je hodnota v roce 2013.

Elektroluminiscence žádné nové či zvětšené defekty na panelu neodhalila, degradace a stárnutí panelu tedy nemá na defekty článků tohoto modulu výrazný vliv.

Amorfní panel

V praktické části byly změřeny dva amorfní panely, z nichž jeden byl nevyužívaný, tudíž nebyl vystaven degradačním mechanismům a klimatickým vlivům, druhý panel byl dva roky v provozu fotovoltaické elektrárny. První panel měl výkon 142,27 Wp, vytížený panel pak 108,39 Wp. Hodnota účinnosti prvního panelu byla 8,99 %, druhého panelu pak pouze 6,85 %. Dle naměřených hodnot je zřejmé, že vytížený panel byl značně degradován, což dokazuje pokles výkonu modulu o 33,88 Wp, a účinnosti o 2,14 %. Srovnání elektrických parametrů panelu je uvedeno Tab. 5.9.

	Nevytížený amorfní panel	Vytížený amorfní panel
P_{mpp}	142,27 Wp	108,39 Wp
U_{mpp}	106,93 V	86,42 V
I_{mpp}	1,33 A	1,25 A
U_{oc}	133,51 V	120,52 V
I_{sc}	1,56 A	1,55 A
EFF	8,99 %	6,85 %

Tab. 5.9: Srovnání parametrů amorfního panelu

Míra degradace amorfního panelu byla určena pomocí vztahu rov. 5.17 .

$$degradace = \frac{P_{mppSTC1} - P_{mppSTC2}}{P_{mppSTC1}} \cdot 100 = \quad (5.16)$$

$$= \frac{142,27 - 108,39}{142,27} \cdot 100 = 23,81\%, \quad (5.17)$$

kde $P_{mppSTC1}$ je výkon nevytíženého amorfního panelu a $P_{mppSTC2}$ je hodnota výkonu vytíženého amorfního panelu.

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zhodnotit vliv stárnutí a degradačních mechanismů na parametry fotovoltaických panelů prostřednictvím jejich dlouhodobého monitorování. Dále se mělo provést porovnání naměřených výsledků s hodnotami získanými v předešlých letech a na základě jejich rozdílu vyhodnotit, zda u vybraných fotovoltaických panelů došlo k degradaci jejich parametrů a ke vzniku, případně zhoršení defektů jednotlivých článků modulu.

Při řešení zadání diplomové práce byla prostudována problematika týkající se fyzikálního principu fotovoltaických panelů, defektů ovlivňujících jejich parametry a kvalitu a měřicí metody, jejichž aplikací byly získány potřebné výsledky. Jsou zde popsány jednotlivé části panelů a materiály, ze kterých se vyrábí, parametry, jež byly předmětem testování, dále je zde uveden popis a klasifikace defektů článků panelů. Poslední kapitola v teoretické části pak podrobně popisuje venkovní i laboratorní měřicí metody, které byly na panely aplikovány.

V úvodu praktické části jsou popsány testované panely, včetně jejich parametrů udávaných výrobcem. Celkem byly měřeny tři panely z monokrystalického křemíku, jeden panel z polykrystalického křemíku a jeden amorfní modul. Všechny panely, kromě amorfního, byly v předešlých letech zapojeny do experimentální fotovoltaické elektrárny na střeše budovy VUT, aby se co nejlépe simuloval jejich reálný provoz. Některé moduly byly i součástí výuku předmětů, zabývajících se obnovitelnými a alternativními zdroji energie.

Měření V–A charakteristik pomocí analyzátoru PROVA 210 se provádí při venkovních podmínkách a tak simuluje měření panelů přímo v provozu FVE. Jelikož u tohoto testování nelze zaručit stejné podmínky pro všechna měření, vznikají, na rozdíl od laboratorních metod, u naměřených výsledků odchylky a chyby měření. Naměřené výsledky potvrdily degradaci u testovaných panelů.

Termovizní diagnostika byla limitována časem zapůjčení termovizní kamery, proto jsou v práci pouze dva snímky modulů. Získané snímky přední strany modulů odhalily na panelech Solartec STR 36-50 a Microsol MM0225–G vady v podobě horkých míst tzv. hot spots, které způsobují defekty krystalické mřížky článků a mají za následek jejich nadměrné ohřívání, které může způsobit až celkovou destrukci panelu.

Měření V–A charakteristik pomocí FLASH testu probíhá při standardizovaných měřicích podmínkách a umožňuje tak detailně analyzovat změnu parametrů fotovoltaického modulu vlivem degradačních mechanismů a stárnutí. Měření poukázalo na to, že testované panely z monokrystalického a polykrystalického křemíku byly poměrně stabilní, největší změnu parametrů vykázal modul Microsol MM0225–G, který byl ale vystaven degradačním testům TCT a HF. Hodnota naměřeného výkonu panelu klesla o 13,2 %, čímž lze konstatovat, že provedené testy měly na degradaci

panelu významná vliv. FLASH testem byly dále měřeny dva amorfní panely, z nichž jeden nebyl vůbec vytížený a nebyl tedy vystaven vlivu degračních mechanismů, druhý panel byl dva roky v provozu FVE. Rozdíl hodnot naměřeného výkonu obou panelů byl opravdu velký, konkrétně vytížený panel vykazoval o 33,88 Wp menší výkon než panel nevytížený. Je zde potřeba brát v úvahu také to, že amorfní panel byl v provozu celé dva roky, kdežto ostatní panely byly odpojovány kvůli potřebám laboratorních úloh apod. Lze ale konstatovat, že měřený panel z amorfního křemíku byl, ze všech testovaných modulů, nejvíce degradován.

Měření metodou elektroluminiscence odhalilo defekty jednotlivých fotovoltaických článků panelu. Nejvíce defektů měl modul Solartec STR 36-50, jehož články vykazovaly velké množství vírových defektů a vnitřního pnutí, jeden článek nefungoval vůbec. U modulů Rich Solar RS-M185 a Microsol MM0225-G je většina článků v pořádku, pouze u některých se vyskytují praskliny, případně ulomený roh. U panelu z polykrystalického křemíku nebyly objeveny žádné nově vzniklé defekty, pouze pár článků vykazovalo zvětšení defektu vlivem degradace modulu.

V poslední části práce je uvedeno srovnání parametrů jednotlivých testovaných panelů a vyhodnocení jejich změn vlivem degračních mechanismů. U panelu Solartec STR 36-50 byl pokles účinnosti vlivem degradace a klimatických podmínek 0,22 %, Rich Solar RS-M185 vykazoval nižší hodnotu o 0,17 %, u modulu Microsol MM0225-G se hodnota účinnosti vlivem degračních testů snížila o 0,8 %, a u polykrystalického panelu Solartec to pak bylo o 0,62 %. Největší pokles účinnosti zaznamenal amorfní panel a to o 2,14 %.

Srovnáním testovaných modulů lze konstatovat, že na panely 1. generace z monokrystalického a polykrystalického křemíku mají degrační mechanismy a stárnutí menší vliv, než na panely 2. generace z křemíku amorfního.

LITERATURA

- [1] MURTINGER, Karel; BERANOVSKÝ, Jiří; TOMEŠ, Milan. *Fotovoltaika : Energie ze slunce*. Vyd. 1. Praha : EkoWATT, 2007. 81 s. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [2] *Fotovoltaika pro každého*. [online] 2007 [cit.2011-11-08]. Czech Renewable Energy Agency. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [3] LIBRA, M; POULEK, V. *Solární energie – perspektivní trend současnosti*. Praha, 2006. 149 s. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra fyziky.
- [4] *Základní principy fotovoltaiky*. [online] 2010 [cit.2012-02-13]. W.E.B AG. Dostupné z WWW: <http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/slunce_11>.
- [5] *Energie slunce – výroba elektřiny*. [online] 2011 [cit.2012-02-16]. EkoWATT Dostupné z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/energie-slunce-vyroba-elektriny>>.
- [6] *Silicon ingots*. [online] 2011 [cit.2012-02-18]. TDG Solar Holding Dostupné z WWW: <http://www.tdgsolar.com/productAction!product_a.html?menuName=Silicon%20Ingots&menuInId=065a377c85024da6b1a86c6939bcc8c>.
- [7] *Velmi pružné a ohebné solární panely PowerFilm SOLAR*. [online] 2009 [cit.2012-02-18]. HW server. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/velmi-pruzne-a-ohebne-solarni-panely-powerfilm-solar1>>.
- [8] 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.
- [9] VANĚK, Jiří; KŘIVÍK, Petr; NOVÁK, Vítězslav. *Alternativní zdroje energie*. Brno, 2006. 149 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [10] 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.

- [11] INDRA, Jiří. *Degradace solárních článků světlem*. Brno, 2010. 73 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [12] KAPLANI E.; KAPLANIS S. *Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules*. Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 19, Issue 4, April 2011, Pages 1201-1211, ISSN 1569-190X.
- [13] TOMEŠ. Milan. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011*. Ostrava, 2012. Unie soudních znalců.
- [14] JAKUBES, Jaroslav. *Fenomén „Snail Trails“ / „šnečí cestičky“: — je ohrožen výkon FVE?*. In: TZB-info [online]. 2012 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneци-cesticky>>.
- [15] *Potential Induced Degradation (PID)*. [online] 2010 [cit.2013-03-16]. SMA Solar Technology AG. Dostupné z WWW: <<http://files.sma.de/dl/7418/PID-TI-UEN113410.pdf>>.
- [16] STRNADEL, Jan. *Využití termovize při detekci defektních panelů ve fotovoltaických systémech*. Brno, 2012. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [17] J.N. ROY, GOVARDHAN RAO GARIKI, V. NAGALAKHSMI. *Reference module selection criteria for accurate trstiny of photovoltaic (PV) panels*. Semiconductor Pvt. Ltd., #8-2-608/1/4, Naim Chambers, Road No. 10, Banjara Hills, Hyderabad, AP 500 034, India [online]. 2009 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
- [18] VANĚK, Jiří. *Diagnostické metody fotovoltaických článků založené na generačně-rekombinačních jevech*. Brno, 2008. 32 s. Zkrácená verze habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie.
- [19] ČSN EN61215. *Fotovoltaiické (PV) moduly z krystalického křemíku pro pozemní použití: Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu*. ed. 2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [20] *CCD kamery G2-CCD*. [online] 2002 [cit.2013-04-05]. Moravské přístroje a.s. Dostupné z WWW: <<http://ccd.mii.cz/art?id=321&cat=22%1F=405>>.

- [21] KUDLÁČEK, Ivan. *FDegradální procesy I*. Praha: České vysoké učení technické v Praze 1994. 171 s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A_c	plocha fotovoltaického článku
AM	Air Mass
B_s	substituční atomy Bóru
c	rychlost světla, $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
CCD	Charge–Coupled Device
E	energie tělesa
EFF	efficiency
EVA	ethylvinylacetát
Fe_i	intersciální železo
FF	Fill Factor
FV	fotovoltaický
FVE	fotovoltaická elektrárna
HF	Humidity–Freeze Test
I_L	proud generovaný dopadajícím zářením
I_{mpp}	proud při maximálním výkonu článku
I_{sc}	zkratový proud
LBIC	Light Beam Inducted Current
LBIV	Light Beam Inducted Voltages
LID	Light Induced Degradation
MLP	multiple pulse
MPP	Maximum Power Point
O_i	intersciální kyslík
PB	pracovní bod
PET	polyetyléntereftalát

PID	Potencial Induced Degradation
P_{mpp}	maximální výkon článku
P_{rad}	výkon dopadajícího záření
PVF	polyvinylidenfluorid
R	reflexivita
R_{m}	vnitřní odpor článku
SIMS	Simple Image Manipulation System
SiO_2	oxid křemičitý
SLP	single pulse
STC	Standard Test Conditions
TCT	Thermal Cycling Test
U_{mpp}	napětí při maximálním výkonu článku
U_{OC}	napětí na prázdko
UV	ultraviolet
V–A	volt–ampérová
W_{p}	Watt peak
η_{ef}	účinnost článku fotovoltaického panelu

PŘÍLOHY

Vzhledem k velkému rozsahu diplomové práce jsou všechny přílohy uloženy na přiloženém CD.