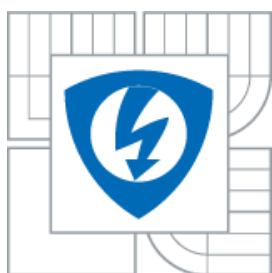




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

TESTOVACÍ PARAMETRY A PODMÍNKY AMORFNÍCH FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ

TEST PARAMETERS AND CONDITIONS OF AMORPHOUS PHOTOVOLTAIC MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

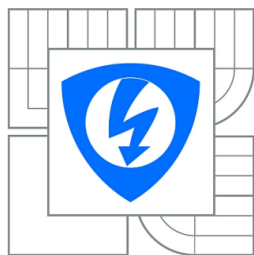
Bc. ADAM KOSTELNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Adam Kostelník

ID: 119490

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Testovací parametry a podmínky amorfních fotovoltaických panelů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vlastnostmi amorfních fotovoltaických panelů a testováním jejich elektrických parametrů. Stanovte různé postupy, jak tyto panely uvést do podmínek testování a porovnejte s postupy definovanými výrobcem. Aplikujte tyto postupy na vybrané fotovoltaické panely vyrobené z amorfního křemíku a výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

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

Tato diplomová práce se zabývá problematikou tenkovrstvých solárních článků, jejich parametry a testováním. V úvodní kapitole jsou popsány vlastnosti jednotlivých tenkovrstvých technologií, shrnuje jejich výhody oproti článkům z krystalického křemíku. Další část práce je výhradně zaměřena na tenkovrstvé články na bázi amorfního křemíku. Zde jsou uvedeny výrobní procesy amorfních článků a prováděné modifikace během výroby. Nedílnou součástí práce je popis základních elektrických veličin FV článku a degradačních mechanismů, které negativně ovlivňují tyto elektrické vlastnosti. Detailně je vysvětlen nejvýznamnější degradační jev tzv. Steabler – Wronski efekt. V práci je provedena rešerše norem týkající se testování amorfních článků a způsoby, jakými lze dosáhnout jejich výkonového ustálení. Praktická část je zaměřena na testování několika jednovrstvých amorfních článků, které byly vystaveny působení degradačních a regeneračních vlivů. Jednou z částí diplomové práce je prostudování nového způsobu testování amorfních článků, u kterého je nutné prokázat, zda se jedná o degradační či regenerační proces. Naměřené hodnoty získané z několika typů měření jsou srovnány, vyhodnoceny a sestrojeny grafické závislosti. V závěru je uvedeno doporučení pro budoucí testování amorfních článků.

Klíčová slova: amorfní článek tenkovrstvý článek, fotovoltaika, Light - soaking test, žihání, degradace, elektrické parametry panelu, Steabler – Wronski efekt, metoda konstantního proudu

ABSTRACT

This master's thesis deals with the problem of thin film solar cells, their parameters and measuring. The introductory chapter describes the properties of individual thin-film technology, summarizes their advantages against the crystalline silicon cell. Another chapter is exclusively focused on thin-film cells based on amorphous silicon. There is described the manufacturing processes of amorphous cells and modifications performed during the manufacturing. One part of master's thesis is dedicated to the description of basic electrical quantities and PV cell degradation mechanisms that negatively affect these electrical properties. It is explained in detail the most important degradation phenomenon called Steabler - Wronski effect. The master's thesis describes standards regarding testing amorphous cells as well as method, how to achieve their performance stability. The practical part is focused on the testing of several single-layer amorphous cells that were exposed to degradation and regeneration effects. One part of the thesis is studying of a new method of testing of amorphous cell, where is necessary to determine whether it is the degradation or regeneration process. Measured values obtained from several types of measurements were compared, evaluated and displayed in the graphs. The recommendation for future testing of amorphous article is stated in the final chapter.

Keywords: amorphous cell, thin - film cell, photovoltaic, light- soaking test, annealing, degradation, electrical parameters of panel, Steabler - Wronski effect, constant current method

KOSTELNÍK, A. *Testovací parametry a podmínky amorfních fotovoltických panelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 84 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Testovací parametry a podmínky amorfních 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 a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Škarvadovi a Ing. Martinu Šturmovi za účinnou pomoc při měření.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Abstrakt	3
Abstract	4
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	13
Úvod	14
1 Základní rozdělení FV článků	15
1.1 První generace.....	15
1.2 Druhá generace	15
1.3 Třetí generace	16
2 Tenkovrstvé FV články	17
2.1 Amorfnní články a-Si.....	17
2.1.1 Vícevrstvé články	17
2.1.2 Články mikroamorfnní a-Si/ μ c-Si.....	19
2.2 Články CIS/CIGS	19
2.2.1 Trubicové systémy	20
2.3 Články CdTe	21
2.4 Výhody oproti ostatním technologiím	22
2.5 Vývojové trendy	24
3 Výroba amorfnního článku	27
4 Základní elektické parametry	29
4.1 Napětí naprázdno V_{OC}	29
4.2 Zkratový proud I_{SC}	29
4.3 Maximální výkon P_{MPP}	29
4.4 Napětí a proud v bodě maximálního výkonu MPP	30
4.5 Účinnost ϕ	30
4.6 Fill Factor FF	30
4.7 Sériový odpor R_S	30
4.8 Paralelní odpor R_P	30

5	Degradační mechanismy	31
5.1	Steabler – Wronski efekt.....	31
5.2	Sezónní efekt.....	32
5.3	Metody potlačení SWE	33
6	Testování amorfních panelů	34
6.1	Solární simulátory	35
6.2	Standardní testovací podmínky STC	35
6.3	Light - soaking podle ČSN EN 61646	36
6.4	Light - soaking podle rozdílných norem.....	37
6.5	Light - soaking podle Mitsubishi	37
6.5.1	Zavedené definice MHI	37
6.6	Žihání	39
7	Praktická část	40
7.1	Etapy měření	40
7.2	Parametry měřených amorfních panelů	42
7.2.1	SO26 1SC1	42
7.2.2	EPV SOLAR EVP-50.....	43
7.3	Metoda měření IV charakteristik	44
7.4	Light - soaking test	46
7.4.1	Popis metody.....	46
7.4.2	Kontrolní měřicí metody.....	48
7.4.3	Naměřená data	51
7.5	Konstantní proud za temna	53
7.5.1	Popis metody.....	53
7.5.2	Naměřená data	53
7.6	Žihání	57
7.6.1	Popis metody.....	58
7.6.2	Naměřená data	59
7.7	Přirozená degradace	60
7.7.1	Naměřená data	60

8	Vyhodnocení naměřených dat	64
8.1	Light – soaking test.....	64
8.2	Konstantní proud za temna	65
8.3	Grafické srovnání Light - soakingu a proudu za temna.....	66
8.4	Žihání	70
8.4.1	Spektrometrie	71
8.5	Přirozené záření	74
8.5.1	Grafy	74
9	Závěr	78
	Seznam zkratk, veličin a symbolů	80
	PŘÍLOHY	81
	Literatura	82

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Struktura článku a-Si (vlevo), proces generování páru elektron-díra v P-I-N [8].....	17
Obr. 2:	Struktura třívrstvého článku a-Si [13].....	18
Obr. 3:	Složení třívrstvého článku a-Si [14]	18
Obr. 4:	Princip pohlcování záření (vlevo) a struktura tandemového článku [10] ...	19
Obr. 5:	Struktura článku CIS/CIGS [12]	20
Obr. 6:	Princip pohlcování záření (vlevo) a konstrukce trubcového článku [16] ...	20
Obr. 7:	Struktura článku CdTe [12]	21
Obr. 8:	Srovnání výtěžnosti jednotlivých technologií [17]	22
Obr. 9:	Srovnání teplotních koeficientů jednotlivých technologií [17]	22
Obr. 10:	Vliv zastínění článku na jeho celkový výkon	23
Obr. 11:	Amorfni panely ve velkém provedení [17]	24
Obr. 12:	Tenkovrstvý FV článek pro střešní aplikace [9]	25
Obr. 13:	Poměrové zastoupení používaných solárních článků pro rok 2013 [5]	26
Obr. 14:	Struktura krystalické mřížky a-Si:H [15]	27
Obr. 15:	Konstrukce zařízení pro výrobu a-Si článku [5]	28
Obr. 16:	Struktura konečného amorfniho panelu [5]	28
Obr. 17:	UI charakteristika FV článku	29
Obr. 18:	Pokles účinnosti v závislosti na čase vlivem SWE [7]	31
Obr. 19:	Energetické rozložení hustoty stavů [18]	32
Obr. 20:	Vzájemné korelace teploty a efektivity amorfniho modulu [7]	32
Obr. 21:	Schéma procesu testování amorfniho modulu dle ČSN EN 61646 [3]	34
Obr. 22:	Znázornění různých typů AM [11]	35
Obr. 23:	Přehled měřících procedur dle MHI a ČSN EN 61646 [3]	38
Obr. 24:	Amorfni článek SO 26 1SC1	42
Obr. 25:	Odpor 5R6	43
Obr. 26:	Amorfni panel EPV-50 a jeho štítek	43
Obr. 27:	Měřicí pracoviště FLASH testeru (horní obrázek) a jeho blokové schéma [20]	45
Obr. 28:	Uspořádání měřícího pracoviště pro Light - soaking test	46

Obr. 29:	Experimentálne pracovisko pro Light – soaking test.....	47
Obr. 30:	Vyzařovací spektrum použité lineární halogenové žárovky [23]	47
Obr. 31:	Spektrum slunečního záření na povrchu Země [22]	48
Obr. 32:	Zařízení pro měření intenzity osvětlení [21].....	48
Obr. 33:	Umístění amorfního článku na podložce	49
Obr. 34:	Rozložení intenzity osvětlení na povrchu podložky a umístění amorfního článku	49
Obr. 35:	Měření teploty povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou	50
Obr. 36:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 100 hodinách.....	51
Obr. 37:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 200 hodinách.....	52
Obr. 38:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 400 hodinách.....	52
Obr. 39:	Schéma zapojení	53
Obr. 40:	Zastíněný amorfní článek připojený ke zdroji proudu.....	54
Obr. 41:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 100 hodinách...	54
Obr. 42:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 200 hodinách...	55
Obr. 43:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 400 hodinách...	55
Obr. 44:	Elektrické parametry a UI charakteristika panelu EPV-50 po 100 hodinách.....	56
Obr. 45:	Elektrické parametry a UI charakteristika panelu EPV-50 po 260 hodinách.....	57
Obr. 46:	Laboratorní tepelná komora Chirana STE31	57
Obr. 47:	Elektrické parametry a UI charakteristika panelu č. II po jeho žíhání.....	59
Obr. 48:	Elektrické parametry a UI charakteristika panelu č. III po jeho žíhání	59
Obr. 49:	Umístění amorfních FV článku na budově VUT, Technická 10	60
Obr. 50:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. I po 750 hodinách	61
Obr. 51:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. I po 1710 hodinách	61
Obr. 52:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 280 hodinách.....	62
Obr. 53:	Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 280 hodinách ...	63
Obr. 54:	Grafická závislost výkonu článků P_{mpp} na čase.....	67
Obr. 55:	Grafická závislost paralelního odporu R_p článků na čase.....	67
Obr. 56:	Grafická závislost zkratového proudu I_{sc} na čase.....	68
Obr. 57:	Grafická závislost proudu v maximálním bodě výkonu I_{mpp} na čase.....	68
Obr. 58:	Grafická závislost napětí naprázdno U_{oc} na čase	69
Obr. 59:	Grafická závislost napětí v maximálním bodě výkonu U_{mpp} na čase.....	69
Obr. 60:	Amorfni článek po žíhání.....	70

Obr. 61:	Uspořádání pracoviště pro měření propustnosti pomocí spektrometru	71
Obr. 62:	Spektrální charakteristika výstupního paprsku ze zdroje AvaLight – HAL-S [24]	72
Obr. 63:	Degradovaný vzorek (vlevo) a nedegradovaný vzorek polymeru	72
Obr. 64:	Teoretická spektrální odezva jednovrstvého amorfního článku a-Si:H [14]	72
Obr. 65:	Závislost propustnosti degradovaného a nedegradovaného vzorku na vlnové délce v celém měřeném spektru	73
Obr. 66:	Grafická závislost proudu v maximálním bodě výkonu I_{mpp} na čase	75
Obr. 67:	Grafická závislost zkratového proudu I_{sc} a proudu v maximálním bodě výkonu I_{mpp} na čase	75
Obr. 68:	Grafická závislost paralelního odporu R_p na čase	76
Obr. 69:	Grafická závislost napětí naprázdno U_{oc} a napětí v maximálním bodě výkonu U_{mpp} na čase	76

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Účinnost a potřebná plocha nejpoužívanějších tenkovrstvých článků	21
Tab. 2: Rozdělení solárních simulátorů	35
Tab. 3: Kritérie Light - soaking testu v různých zemích	37
Tab. 4: Elektrické parametry panelu SO26 1SC1	42
Tab. 5: Elektrické parametry panelu EPV 50	44
Tab. 6: Elektrické parametry článku číslo II.....	51
Tab. 7: Elektrické parametry článku č. III	54
Tab. 8: Elektrické parametry panelu EPV 50	56
Tab. 9: Elektrické parametry článku číslo I.....	60
Tab. 10: Elektrické parametry článku číslo II.....	62
Tab. 11: Elektrické parametry článku číslo III	63
Tab. 12: Srovnání tabulkových a změřených hodnot ihned po zakoupení článků.....	64
Tab. 13: Parametry amorfního článku a jeho degradace vlivem Light - soakingu.....	64
Tab. 14: Parametry amorfního článku č. III a jeho degradace vlivem působení proudu 0,4 A	65
Tab. 15: Parametry amorfního panelu EPV 50 a jeho degradace vlivem působení proudu 0,25 a 0,52 A.....	65
Tab. 16: Elektrické parametry č. II – článek vystaven působení Light – soaking testu	70
Tab. 17: Elektrické parametry článku č. III – článek vystaven působení konstantního proudu za temna	71
Tab. 18: Parametry amorfního článku a jeho degradace vlivem přirozeného záření	74
Tab. 19: Tabulka letošního a dlouhodobého trvání slunečního svitu pro oblast Brna....	74
Tab. 20: Parametry amorfního článku a jeho degradace vlivem přirozeného záření	77
Tab. 21: Parametry amorfního článku a jeho degradace vlivem přirozeného záření	77

ÚVOD

V posledních letech se stále častěji mluví o efektivnějším využívání elektrické energie z obnovitelných zdrojů, jelikož celková spotřeba elektrické energie na světě stoupá každým dnem a neexistuje nevyčerpatelný zdroj elektrické energie. Jednou z možností je získávání elektrické energie ze slunečního záření, které je zdrojem zajišťující život na planetě, jak ho známe.

Věda zabývající se přímou přeměnou sluneční energie na elektrickou se jmenuje fotovoltaika. Je to celosvětově jeden z nejrychleji rozvíjejících se vědních oborů s ročním nárůstem instalovaného výkonu převyšující 30 %. Vývojové trendy nám napovídají, že zájem o fotovoltaický průmysl se neustále zvyšuje a v budoucnu bude mít velký podíl na celkové výrobě elektrické energie. Fotovoltaika zaznamenala největší rozmach za posledních 20 let a v současnosti je vývoj zaměřený výhradně na technologie tenkovrstvých článků.

Mezi tuto technologii patří také články na bázi amorfního křemíku a jeho vylepšené modifikace, které jsou stále ve vývoji a jsou předmětem zkoumání mnoha výrobců. Nejdůležitějším zkoumaným parametrem stále zůstává dosažená účinnost FV článku za současného snižování výrobních nákladů. V diplomové práci je hlavní pozornost věnována tenkovrstvým článkům na bázi amorfního křemíku, jejich výrobě, modifikacím, základním elektrickým parametrům a degradačním mechanismům, které ovlivňují konečnou efektivitu článku. Dále je zde provedena rešerše norem týkající se testování amorfních článků. Jsou zde detailně popsány procedury a podmínky, za kterých lze dosáhnout výkonové stabilizace elektrických parametrů článku.

V praktické části byla realizována sada měření, kde bylo testováno několik jednovrstvých amorfních článků. Každý amorfní článek byl vystaven jinému typu degradačního mechanismu. V diplomové práci je provedeno testování zcela nového typu mechanismu, u kterého je potřeba zjistit, zda se jedná o degradační nebo regenerační proces. Všechny naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny, srovnány a zobrazeny v grafické podobě. V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky a provedeno doporučení pro budoucí testování FV článku na bázi amorfního křemíku.

1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ FV ČLÁNKŮ

1.1 První generace

První generací se nazývají fotovoltaické články využívající jako základ křemíkové desky. Jsou dnes nejrozšířenější technologií na trhu (cca 90 %) a dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (v sériové výrobě 16 až 19 %, speciální struktury až 24 %). Komerčně se začaly prodávat v sedmdesátých letech. Přestože je jejich výroba relativně drahá (a to zejména z důvodu drahého vstupního materiálu – krystalického křemíku), budou ještě v několika dalších letech na trhu dominovat.[6]

1.2 Druhá generace

Hlavním důvodem vývoje této technologie je nedostatek křemíku s výhledem na potřeby budování fotovoltaických zdrojů do roku 2100. Dalším důvodem byla především snaha o snížení výrobních nákladů úsporou drahého základního materiálu – křemíku. Články druhé generace se vyznačují 100 – 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou (thin-film). Druhá generace fotovoltaických článků je tvořena tenkovrstvými články na bázi amorfního křemíku (a-Si), amorfních slitin Si-Ge (a-SiGe), mikrokrytalického Si (μ c-Si) nebo polykrytalického tenkovrstvého Si (poly-Si).

S úsporou materiálu došlo v porovnání s články první generace k poklesu výrobních nákladů (a tedy za předpokladu velkosériové výroby i k poklesu ceny), nicméně dosahovaná účinnost je obvykle nižší, ale zkušenosti z vývoje naznačují, že tato účinnost v budoucnu poroste. Není vyloučeno, že vícevrstvé struktury dokonce účinnost křemíku v budoucnu předčí. Nespornou výhodou tenkovrstvých článků je možnost volby substrátu, na niž se tenkovrstvé struktury deponují a v případě použití flexibilních materiálů (organické, kovové či textilní folie) i značně širší aplikační sféra. Komerčně se začaly články druhé generace prodávat v polovině osmdesátých let.[6]

1.3 Třetí generace

Pokus o „fotovoltaickou revoluci“ představují solární články třetí generace. Zde je hlavním cílem nejen snaha o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron - díra („proudový“ zisk), ale i maximalizace využití energie dopadajících fotonů („napětový“ zisk fotovoltaických článků). Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:

- vícevrstvé solární články
- články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články

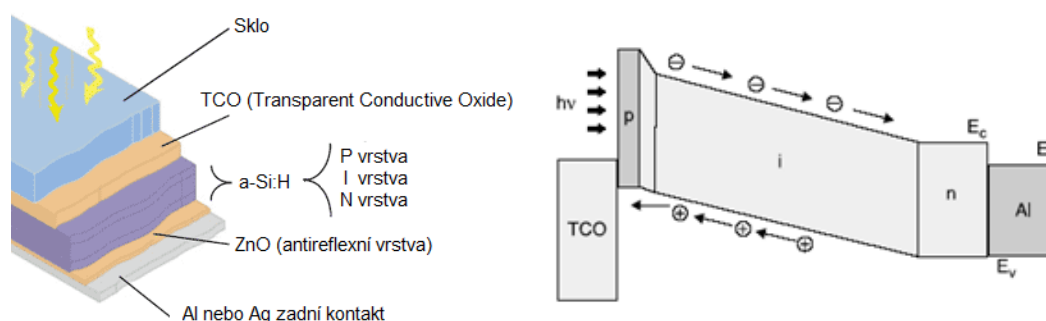
Zatím jediným komerčním příkladem dobře fungujících článků třetí generace jsou vícevrstvé struktury.[6]

2 TENKOVrstVÉ FV ČLÁNKY

U materiálů s vysokým absorpčním koeficientem je možné realizovat fotovoltaický článek ve vrstvě o tloušťce několika μm , což představuje výrazné úspory polovodičového materiálu. Tenkovrstvé články a moduly byly vyvíjeny prakticky souběžně s články z krystalického křemíku. Pro tenkovrstvé články a moduly je nutná technologie výroby umožňující realizovat reprodukovatelně tenké vrstvy o vysoké účinnosti fotovoltaické přeměny energie a vysoké stabilitě.[5]

2.1 Amorfnní články a-Si

Křemík v amorfnní formě má absorpční hranu na rozhraní infračervené a červené. K úplné absorpci viditelného světla postačuje pouze vrstva o tloušťce cca $1\ \mu\text{m}$, protože amorfnní křemík má asi 10 krát vyšší absorpční koeficient α v oblasti slunečního záření oproti krystalickému křemíku. Amorfnní články mohou být díky této tenké vrstvě pružné a ohebné.

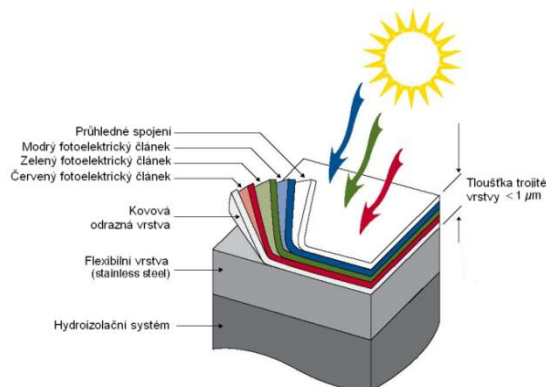


Obr. 1: Struktura článku a-Si (vlevo), proces generování páru elektron-díra v P-I-N [8]

Pro zlepšení sběru fotogenerovaných nositelů je zvolena struktura P-I-N (Obr. 1). Vrstva P je schopná zachytit pouze malé množství fotonů, zatímco velká většina párů elektron-díra je generována v oblasti silného vnitřního elektrického pole v nedotované intriniské vrstvě I.

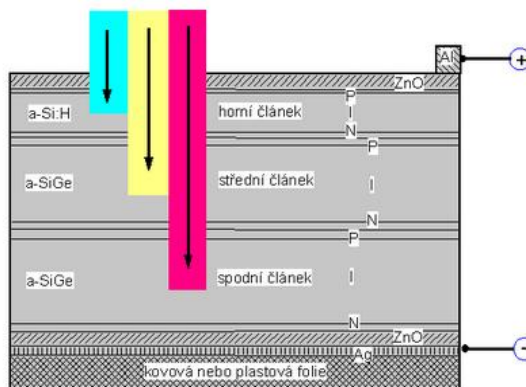
2.1.1 Vícevrstvé články

Zvýšení účinnosti amorfnního článku se docílí kombinací více vrstev a-Si, kde každá vrstva využívá pouze část slunečního spektra a zbylé záření propouští do nižších vrstev. V současnosti je známá technologie **Triple Junction** (Obr. 2), která u článků umožňuje vyšší využití spektra slunečního záření. Každá vrstva je dotována jiným prvkem tak, aby celkové využití energie spektra slunečního záření bylo maximální.



Obr. 2: Struktura třívrstvého článku a-Si [13]

Základ článku tvoří tři buňky amorfního křemíku vakuově nanesené ve třech P-I-N přechodech nad sebou na podkladové vrstvě (Obr. 3). Spodní záporný pól článku tvoří základní fólie z ušlechtilé ocelové fólie vhodně upravená plastickými potahy, na kterou jsou nanášeny jednotlivé P-I-N přechody. Horní kladný pól je vytvořen z průhledné mřížky z vláken z ušlechtilé oceli. Materiál tvořící jednotlivé P-I-N přechody může být různý. První přechod je tvořen a-Si:H, druhý přechod je tvořen slitinou a-Si-Ge a třetí přechod je také tvořen slitinou a-Si-Ge, ale s vyšším obsahem Ge, abychom docílili využití celého spektra slunečního záření. Každý z P-I-N přechodů absorbuje totiž jinou vlnovou délku spektra slunečního záření. [13] Tloušťka každé vrstvy je pak zvolena tak, aby v každé z nich bylo generováno stejné množství elektronů a děr (stejný proud), výsledné napětí na článku je pak dáno součtem jednotlivých napětí a přesahuje 2 V, sériovým zapojením je pak dosaženo žádaného výstupního napětí. [13]

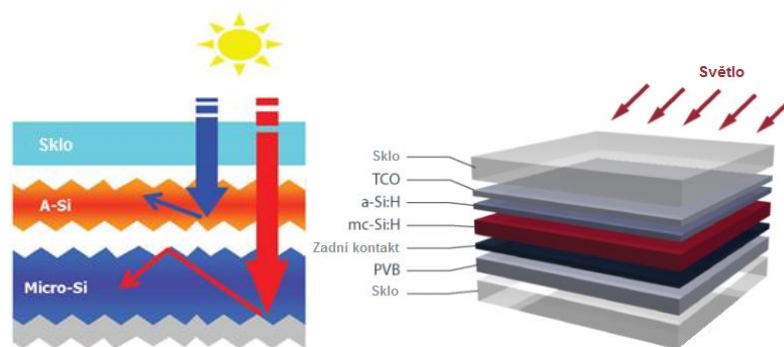


Obr. 3: Složení třívrstvého článku a-Si [14]

FV systémy na bázi třívrstvé technologie mohou využívat vedle červené složky i složku zelenožlutou a modrou dopadajícího světla a zůstávají proto funkční i při difúzním světle při zastínění a při zatažené obloze. Mohou tedy pracovat i na plochách odvrácených od Slunce. [13]

2.1.2 Články mikroamorfni a-Si/ μ c-Si

Jedná se o tzv. tandemovou strukturu s dvojitým přechodem absorbující více denního světla a tím vylepšuje energetickou účinnost FV modulu. Amorfni křemík má vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté části spektra. Naopak mikrokrystalický křemík pak dobře absorbuje i v oblasti červené a infračervené, jak je zobrazeno na Obr. 4. Fotovoltaický účinek je tvořen na dvou ultra tenkých vrstvách křemíku: mikrokrystalický křemík a amorfni křemík.



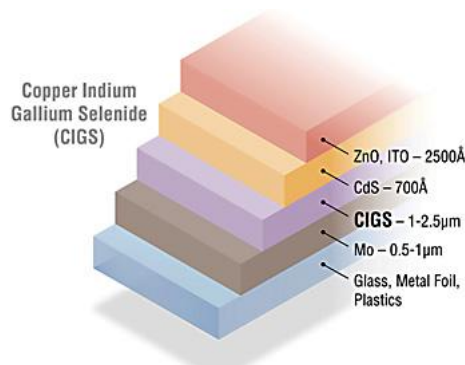
Obr. 4: Princip pohlcování záření (vlevo) a struktura tandemového článku [10]

Křemíkové vrstvy jsou deponovány na skleněný substrát a to stejným zařízením, jako se používá na výrobu plochých LCD (Obr. 4). Křemíkové vrstvy pokrývají skleněnou podložku a několik řezů laserem rozdělí tenké polovodičové vrstvy na jednotlivé FV články a to po celém modulu. Zadní elektrický kontakt je poté deponován (položen) na celou strukturu článku a jednotlivé články propojí do série. Dále je vytvořena bezrámová struktura modulu sklo/sklo tím, že se přilaminuje pomocí spojovací mezivrstvy (PVB nebo EVA) druhá deska skla. Tento sendvič plně chrání FV vrstvy a elektrické kontakty uvnitř tohoto tzv. laminátu. Tím je zaručena dlouhodobá celistvost modulu. Pokovené ocelové profily přilepené na zadní stranu modulu plní dvě funkce. Jednak zpevňují modul a dále mohou sloužit pro připevnění modulu na nosnou konstrukci. [10]

2.2 Články CIS/CIGS

Technologie CIGS má PN přechod složen ze 4 prvků: měď-indium-galium-diselenid (Obr. 5). Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny napařovací technologií. Tenká vrstva CIGS je deponována na podkladové sklo pokryté molybdenem. Tenké linky vytvořené laserem oddělují jednotlivé články na podkladovém skle a ty jsou posléze propojeny do série. Transparentní vrstva ZnO odvádí elektrický proud generovaný fotovoltaičným účinkem dopadajícího slunečního světla.

CIGS technologie dosahuje vyšší konverzní účinnosti. Ze stejného množství slunečního záření generuje více elektřiny než ostatní tenkovrstvé články. Účinnost je cca 8,5 – 12 % a je velmi stabilní tzn., nedegraduje. Výkon ostatních FV materiálů může rapidně klesat s dobou užívání. Přidáním malého množství galia dochází k rozšíření absorpčního pásma, což více odpovídá solárnímu spektru, a tím zvýšením účinnosti solární buňky.



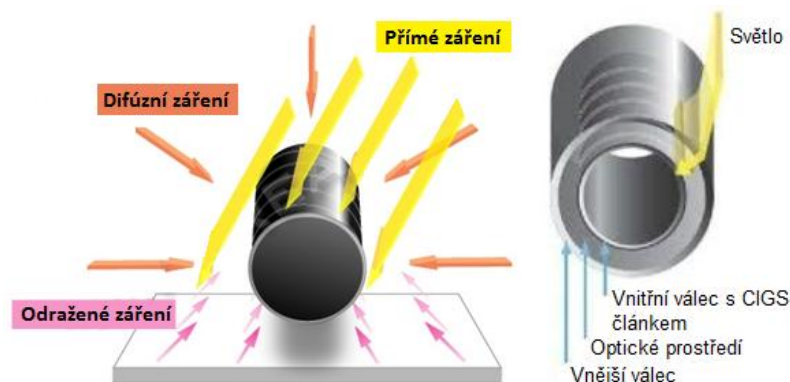
Obr. 5: Struktura článku CIS/CIGS [12]

2.2.1 Trubicové systémy

Výhod článků CIGS využívají pokročilé trubicové systémy, které umí zpracovat všechny druhy záření: přímé, difúzní a odražené (Obr. 6). Solární modul je hermeticky uzavřen, aby nedocházelo ke ztrátám výkonu. Těsnění ze skla a kovu na konci každé trubice spolehlivě brání vniknutí vlhkosti, což zaručuje spolehlivost, odolnost a účinnost FV systému. Trubice těchto solárních modulů jsou tvořeny ze dvou v sobě uložených válců (Obr. 6):

- Vnitřní válec obklopuje solární článek CIGS, jenž je sám chráněn speciální silikonovou tekutinou v meziprostoru a ve vnějším válci.
- Vnější válec láme dopadající světlo a vede je přímo ke článku bez ohledu na to, v jakém úhlu světelné paprsky na modul dopadají. [16]

Prostor mezi dvěma válci je vyplněn chemickým materiálem tvořícím optickou čočku. Ta napomáhá koncentraci dopadajících paprsků, které dopadají na fotovoltaickou vrstvu vždy kolmo. [16]

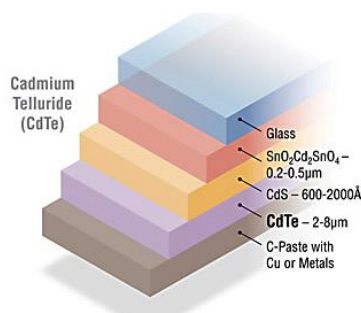


Obr. 6: Princip pohlcování záření (vlevo) a konstrukce trubicového článku [16]

2.3 Články CdTe

PN přechod CdTe článku se skládá ze sloučeniny Kadmia a Teluru. Horní vrstva je typu P (CdS – Kadmium Sulfid) a spodní vrstva je typu N (CdTe). Obě vrstvy jsou velice tenké (Obr. 7) a při výrobě jsou nanášeny ve vakuové komoře. Za zmínku stojí, že tato technologie využívá velice málo polovodičového materiálu (2% ve srovnání s technologií krystalických křemíkových článků).

CdTe nabízí hned několik výhod oproti ostatním tenkovrstvým technologiím. Jedná se o relativně jednoduchou a tím pádem levnou výrobu. Energetická návratnost (EPBT - Energy Payback Time) je nejnižší ze všech tenkovrstvých technologií. V současnosti je návratnost méně než 1 rok a stále klesá. Další výhodou CdTe modulů je nejlepší hodnota teplotního koeficientu, díky kterému článek neztrácí svůj výkon i při vysokých teplotách. CdTe články jsou velmi výhodné použít v oblastech s vysokým zastíněním, kde dovedou využít velkou část denního spektra. Dosažitelná účinnost se pohybuje v rozmezí 9 – 11 %. Přehledné srovnání tenkovrstvých technologií je uvedeno v Tab. 1



Obr. 7: Struktura článku CdTe [12]

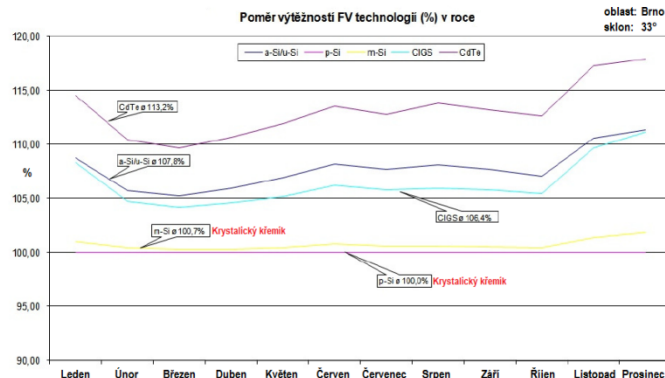
Tab. 1: Účinnost a potřebná plocha nejpoužívanějších tenkovrstvých článků

Typ technologie	a-Si:H	CdTe	CIGS/CIS	a-Si/ μ c-Si
Účinnost [%]	5 - 9	9 - 11	7 - 11	7 - 9
Potřebná plocha na kW _p [m ²]	15	9	10	12

2.4 Výhody oproti ostatním technologiím

a) Vyšší energetická výtěžnost

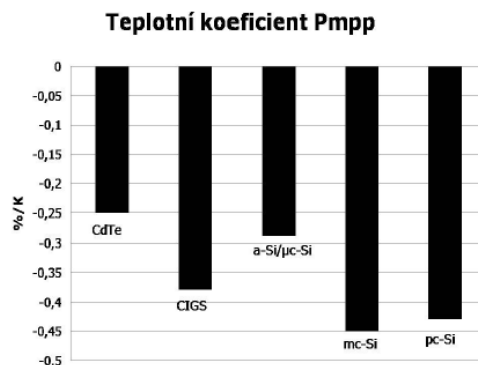
Tenkovrstvé technologie pracují i za zhoršených klimatických podmínek, takže reálný vygenerovaný výkon je cca o 8 - 11 % větší než u panelů na bázi krystalického křemíku (Obr. 8). Je to v důsledku toho, že při nižších intenzitách slunečního záření roste relativní účinnost amorfního článku, zatímco u článku na bázi krystalického křemíku klesá. Průměrné složení ročního ozáření v ČR se skládá okolo 65 – 70 % z difuzní složky, na kterou je amorfní článek citlivý.



Obr. 8: Srovnání výtěžnosti jednotlivých technologií [17]

b) Lepší výkonový teplotní koeficient γ

Obecně jsou fotovoltaické technologie vysoce závislé na teplotě. Každý panel má svůj výkonový teplotní koeficient, který popisuje pokles výkonu panelů s nárůstem teploty. Jako referenční hodnota je brána teplota 25 °C. Srovnání jednotlivých technologií je graficky zobrazeno na Obr. 9, kde je vidět průměrná hodnota výkonného koeficientu u tenkovrstvé technologie výrazně nižší, než u článku na bázi krystalického křemíku. Tato vlastnost předurčuje amorfni článek např. k použití na střechy budov, kde za letních měsíců panují vysoké teploty.



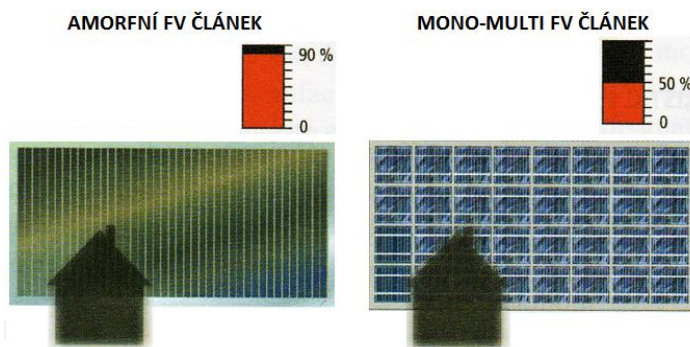
Obr. 9: Srovnání teplotních koeficientů jednotlivých technologií [17]

c) Lepší napěťový teplotní koeficient β

Tento koeficient popisuje rozdíl výstupního napětí panelu v závislosti na jejich teplotě. Jako referenční údaj je opět brána teplota 25 °C. Pro srovnání například průměrná hodnota napěťového koeficientu u tenkovrstvé technologie je $\beta = -0,28 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, zatímco u článku na bázi krystalického křemíku $\beta = -0,38 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Napěťový teplotní koeficient musíme např. uvažovat při návrhu FVE. V dané lokalitě musíme počítat s určitým rozsahem teplot, který se nám promítne na počtu panelů zapojených v sérii do jednoho stringu a také na výběru invertoru. Zde nám vyvstává výhoda použití amorfních článků. Invertory mají vždy určitý rozsah pracovního napětí a při velkém rozsahu teplot je větší problém najít optimální inverter pro FVE projektovanou z panelů na bázi krystalického křemíku.

d) Vyšší odolnost proti zastínění

Panely c-Si jsou velmi náchylné na zastínění každého jednotlivého FV článku. Při zastínění FV článku se začne chovat jako spotřebič a ohrozí správnou funkci celého FV modulu a o má za následek ovlivnění i celého stringu. Amorfní články jsou díky jiné technologii podstatně odolnější proti částečnému, ale i celkovému zastínění (Obr. 10).



Obr. 10: Vliv zastínění článku na jeho celkový výkon

e) Nižší citlivost na úhlu dopadu světla

Amorfní články nejsou tak závislé na orientaci ke slunci jako c-Si články, u kterých je ideální orientace k jihu se sklonem cca 30 - 35° (v závislosti na ročním období se ideální sklon značně mění). Technologie je vhodná na místa, kde není možné splnit požadavek optimální orientace fotovoltaického systému, tedy v případech, kdy je kolektorové pole nutné orientovat spíše k východu nebo k západu, tedy u odchylek více než 45° od jihu. Amorfní články mají tedy daleko větší rozsah využití od plochých střech přes fasády až po otevřené instalace s velmi malým úhlem náklonu modulů.

f) Nižší cena

Výhodou amorfních článků je jejich nízká výrobní cena. Ještě donedávna byly amorfní panely levnější o 30 - 40 % oproti c-Si panelům, avšak v posledních letech

čínští výrobci stlačili cenu c-Si na tak nízkou cenu, že rozdíl je už minimální. U velkých amorfních panelů je možné uspořit na instalačních nákladech za konstrukci i DC kabeláže.

g) EPBT (Energy Pay-Back Time)

V překladu se jedná o návratnost vložené energie při výrobě. Například v ČR se náklady na výrobu vrátí vyrobenou energií cca již za 1,5 roku. U c-Si technologie je tomu cca za 4 roky.

h) Příjemný vzhled

Velké amorfní moduly jsou přijatelnější i po vizuální stránce, jelikož panel neobsahuje rámeček a má homogenní barvu (Obr. 11).



Obr. 11: Amorfní panely ve velkém provedení [17]

2.5 Vývojové trendy

Trh v oblasti fotovoltaiky je velice dynamický a v posledních letech došlo k jeho rapidnímu vývoji. Díky rostoucímu zájmu o obnovitelné zdroje energie se výrobní procesy v poslední době značně zdokonalily. Hlavním cílem všech výrobců je zvyšovat efektivitu článku za současného snižování výrobních nákladů. Cena na jednotku výkonu je stále hlavním faktorem v oboru. K dosažení tohoto cíle je třeba především snížit cenu výchozího materiálu, zjednodušit a zlevnit technologii výroby a zvýšit konverzní účinnost FV článků. Dalšími neméně důležitými faktory jsou samozřejmě životnost článku a pokles výkonu s časem. Výrobci používají celou řadu způsobů, jak zdokonalit současné technologie.

Mezi některé způsoby patří:

- *Snižování optických ztrát* - lepší antireflexní vrstvy nebo strukturovaný povrch skla u panelů

- *Zmenšení plochy a odporu kontaktů* – např. přesunutím sběrných kontaktů na zadní stranu se zvýší účinnost
- *Vylepšení vlastností vlastního článku* - např. eliminace poruch v PN přechodu nebo dielektrická pasivační vrstva, která snižuje pravděpodobnost rekombinace elektronů a děr
- *Zvýšení citlivosti na světlo o nižších vlnových délkách* - např. kombinace vrstev amorfního křemíku, který má dobrou účinnost v oblasti krátkých vlnových délek a mikrokrytalického křemíku, který je výhodný v oblasti delších vlnových délek.
- *Přísnější kontroly během výroby a používání* – např. metoda elektroluminiscence
- *Nové typy fólie na zadní stranu panelů* – přispívá k lepšímu odrazu záření, které prošlo tenkou vrstvou křemíku a snížením odporu kontaktů

Obecně lze konstatovat, že nejprudší vývoj a inovace nastává na poli FV článků 3. generace, kde je stále nevyužitý hospodářský a technologický potenciál. Příkladem toho je Německý výrobce ZSW, který 13. 11. 2013 oznámil, že dosáhl světového rekordu v účinnosti tenkovrstvých solárních článků ve výši 20,8 %. Tato hodnota je milníkem ve světě tenkovrstvých technologií, protože vůbec poprvé se podařilo překonat účinnost technologie polykrystalických křemíkových článků. Jednalo se FV článek vyrobený na bázi CIGS.

V oblasti tenkovrstvých modulů probíhá vývoj především směrem ke zlevnění technologie (např. zvýšení depoziční rychlosti jednotlivých vrstev), zvýšení účinnosti a stability článků, respektive modulů. Tento požadavek klade velké nároky na technologická zařízení, která představují hlavní část nákladových položek. V oblasti tenkovrstvých technologií je velký potenciál ke snížení ceny modulů. [5]

Jedno ze zajímavých odvětví, které zaznamenalo obrovský rozvoj, jsou tenkovrstvé ohebné FV články. Jedná se například o třívrstvé FV systém Triple Junction (viz kapitola 2.1), která může sloužit i jako náhrada za střešní krytinu (Obr. 12). Tato technologie má největší potenciál splnit požadavky BIPV (Building Integrated Photovoltaic). V budoucnu by tenkovrstvé technologie mohly nabídnout výjimečné možnosti v celé řadě aplikací (automobilní průmysl, architektura, móda, spotřební elektronika atd.).



Obr. 12: Tenkovrstvý FV článek pro střešní aplikace [9]

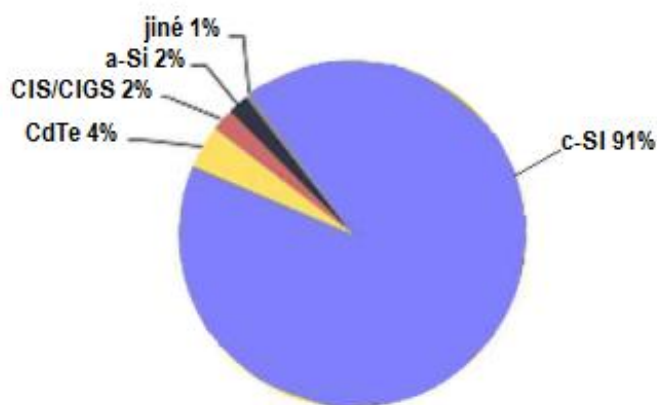
Někteří výrobci experimentují a představují na trh tenké, ohebné a někdy i z části průhledné amorfni články, které údajně vyrobí více energie na watt instalovaného výkonu než klasické křemíkové články. Bohužel, největší překážkou je fakt, že 1m^2

konkrétního článku má slabý výkon.

I když se přední světový výrobci snaží přijít s novinkami v oblasti tenkovrstvých článků, tak nelze v nejbližších letech předpokládat jejich masivní komerční využívání a trhu budou ještě nějaký čas dominovat články na bázi krystalického křemíku, jak je vidět z Obr. 13.

Ve stádiu výzkumu a vývoje je celá řada dalších materiálů a technologií jako:

- články na bázi monokrystalických vrstev
- články na bázi organických polymerů
- fotochemické články (Gratzel, DSSC)
- články na bázi nanočástic
- články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo jámách [14]



Obr. 13: Poměrové zastoupení používaných solárních článků pro rok 2013 [5]

3 VÝROBA AMORFNÍHO ČLÁNKU

Tato diplomová práce se zaměřuje především na tenkovrstvé články vyrobené z amorfního křemíku, protože v praktické části bude realizováno měření FV článku vyrobeného na této bázi.

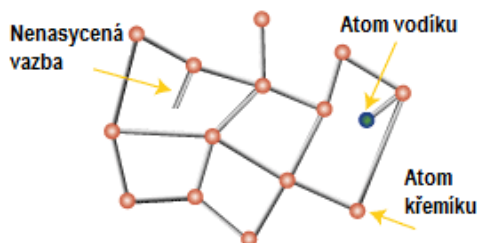
Výrobní proces funguje na principu rozkladu vhodných sloučenin křemíku, silanu nebo dichlorsilanu ve vodíkové atmosféře. Amorfni křemík (a-Si) se vyznačuje nepravidelnou krystalickou strukturou, která není periodická v celém objemu a obsahuje určité množství vodíku. Vlivem neperiodicity vznikají v materiálu nenasyčené vazby křemíku (poruchy) s homogenním rozložením (Obr. 14). Atomy křemíku nemají sousední atomy, se kterými by mohly tvořit vazbu. V těchto místech může docházet k rekombinaci nábojů, což má za následek snížení proudu a účinnosti článku.

Nenasycené vazby a-Si jsou tedy nežádoucí, a proto se vzorky pasivují vodíkem a získává se tak a-Si:H (hydrogenizovaný amorfni křemík). Při depozici ze směsi SiH_4 a H_2 pak vzniká a-Si:H, což je „slitina“ s obsahem 5 - 10 % vodíku se sníženým výskytem nenasyčených vazeb na přijatelnou mez (materiál vhodný pro výrobu solárních článků).

Vrstvy amorfniho nebo krystalického křemíku jsou obvykle deponovány chemickou depozicí z plynné fáze, založené na dekompozici silanu.



Rychlost růstu a struktura vrstvy (amorfni nebo mikrokrytalický křemík) závisí na teplotě podložky a koncentraci silanu ve směsi s vodíkem (nižší koncentrace silanu vede k růstu mikrokrytalického Si).

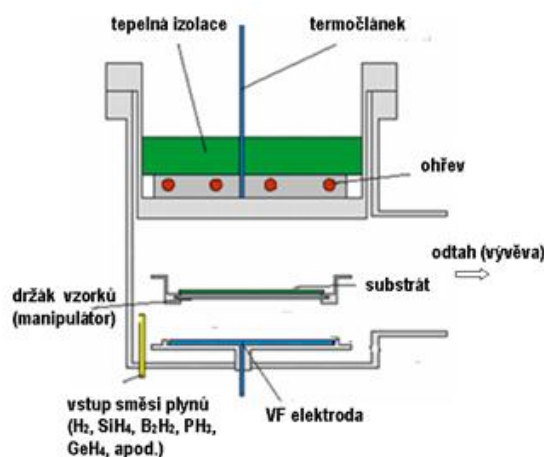


Obr. 14: Struktura krystalické mřížky a-Si:H [15]

Amorfni články se vyrábí ve vakuové komoře (Obr. 15) při teplotách kolem 200 °C, kde je napařováním nanášena velice tenká (0,001 mm) vrstva amorfniho křemíku na podkladový materiál (sklo, kov nebo plast). Výroba tenkovrstvých technologií je oproti krystalickým technologiím výrazně levnější, méně materiálově i energeticky náročná a také má menší dopad na životní prostředí. Tenké vrstvy jsou deponovány různými technologiemi; napařováním, naprašováním, chemickou depozicí z plynné fáze (CVD), elektrochemicky, apod. Ve většině případů se vrstvy TCO (SnO_2 , ITO, ZnO) provádí naprašováním. Důležitým konstrukčním a technologickým problémem je dosažení nízkého sériového odporu R_s . Vzhledem k vysokému příčnému odporu vrstev se z osvětlené (přední) strany fotovoltaického článku odvádí proud pomocí vrstvy transparentního vodivého oxidu (TCO) sloužící i jako antireflexní vrstva. Vrstva TCO často slouží jako difúzní bariéra na kovovém kontaktu.

V průběhu výroby se nerealizují jednotlivé články, ale pouze celé moduly v sekvenci technologických operací. Z tohoto důvodu musí rozměry pracovní komory depozičního zařízení odpovídat rozměrům vyráběného modulu. Průběh výroby je následující:

- na nosnou podložku (sklo, kov, plast) je deponována vrstva TCO (transparentní vodivý oxid)
- laserem jsou odděleny oblasti jednotlivých článků ve tvaru proužků (odstranění TCO)
- provedení plasmatická depozice tenkovrstvého článku
- odstranění struktury článku laserem v proužku těsně přiléhajícím k hranici vymezené prvním laserovým řezem
- deponován kovový kontakt (nejčastěji naprašováním)
- řez laserem, odstraňující proužek kovového kontaktu tak, aby vznikla struktura modulu se sériově zapojenými články [4]



Obr. 15: Konstrukce zařízení pro výrobu a-Si článku [5]

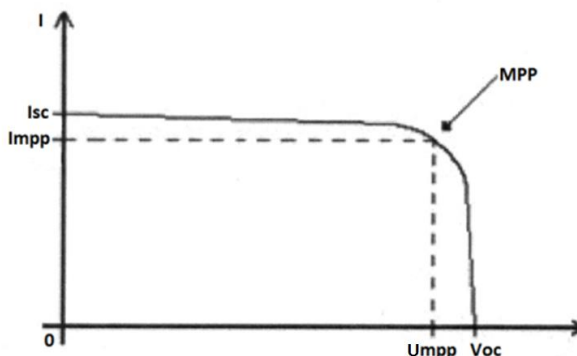


Obr. 16: Struktura konečného amorfního panelu [5]

Výsledný modul (Obr. 16) je zapouzdřen v průsvitném polymerním ochranném obalu, který je vysoce odolný proti mechanickému poškození a oděru, má samočisticí schopnost a zabraňuje tvorbě usazenin na horním povrchu, které by snižovaly účinnost. Materiál obalu je na bázi EVA a na bázi teflonu - TEFZEL. [13] Dále se na zadní stranu připojují pomocí vodivého lepidla kontakty.

4 ZÁKLADNÍ ELEKTICKÉ PARAMETRY

FV článek si můžeme zjednodušeně představit jako PN přechod v propustném směru, který má svoji konkrétní UI charakteristiku a s tím spojené základní elektrické veličiny určující vlastnosti každého modulu. Ideální UI charakteristika FV modulu má průběh zobrazený na Obr. 17. Průběh UI charakteristiky je značně závislý na teplotě a intenzitě slunečního záření.



Obr. 17: UI charakteristika FV článku

4.1 Napětí naprázdno U_{OC}

Jedná se o maximální hodnotu napětí na výstupních svorkách FV článku při nulovém proudu, bez připojené zátěže za dané teploty a intenzity osvětlení. Hodnota U_{OC} se pohybuje v desítkách až stovkách V.

4.2 Zkratový proud I_{SC}

Jedná se o maximální hodnotu proudu za daného osvětlení a při nulovém napětí článku. 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. [2]

4.3 Maximální výkon P_{MPP}

Hlavní jednotkou je W_p (Watt Peak – špičkový výkon). Jedná se o maximální výkon, který je panel schopen dodávat při dodržení podmínek STC. Hodnota maximálního výkonu je dána vztahem 1.2.

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}, \quad (1.2)$$

kde je U_{MPP} napětí v bodě maximálního výkonu panelu, I_{MPP} proud v bodě maximálního výkonu panelu.

4.4 Napětí a proud v bodě maximálního výkonu MPP

MPP je bod na UI charakteristice, který udává hodnotu maximálního výkonu FV článku. Bod MPP je vyjádřen pomocí hodnoty proudu (I_{MPP}) a napětí (U_{MPP}) z UI charakteristiky.

4.5 Účinnost η

Účinnost fotovoltaického panelu 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. Účinnost článku fotovoltaického panelu můžeme definovat vzorcem 1.3.

$$\eta_{ef} = \frac{P_{MPP}}{P_{rad}} = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A_c}, \quad (1.3)$$

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

4.6 Fill Factor FF

Je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodičové vrstvy. V překladu ho známe pod názvem činitel plnění, a čím je tato hodnota větší, tím větší výkon je schopen FV článek dodat do zátěže. Průměrná hodnota u amorfních článků se pohybuje kolem 0,6. Fill Factor vychází ze vztahu 1.4.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (1.4)$$

4.7 Sériový odpor R_s

Je ukazatelem kvality FV článku. Jedná se o parazitní odpor, který je odvozen z celkového odporu materiálu polovodiče, odporu kontaktů a propojení. Kvalitní článek by měl mít hodnotu R_s co nejnižší, protože jeho vysoká hodnota způsobuje úbytek napětí na svorkách panelu.

4.8 Paralelní odpor R_p

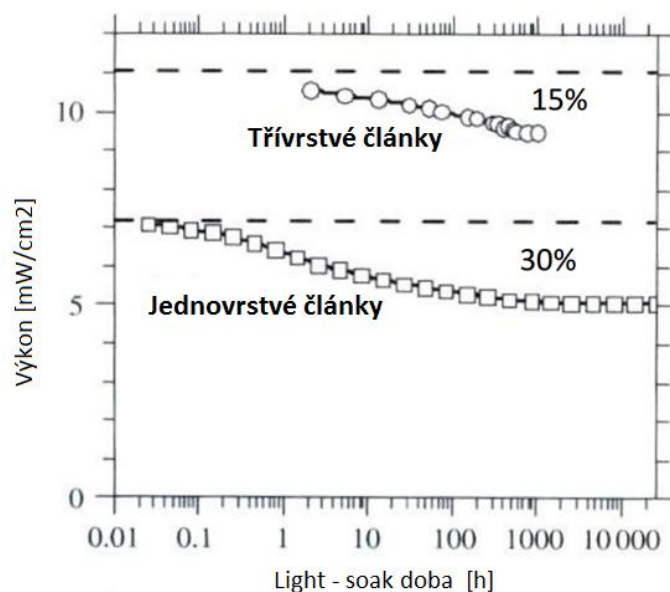
Ve většině případů je způsobem rozsáhlými defekty. Příliš nízká hodnota R_p indikuje nekvalitní FV článek, který se chová téměř jako zkrat. Hodnota by měla být co nejvyšší (teoreticky nekonečný elektrický odpor).

5 DEGRADAČNÍ MECHANISMY

Degradační mechanismy mají za následek změnu elektrických a optických vlastností materiálu. U amorfního křemíku se na degradaci materiálu nejvíce podílí vliv osvětlení, též známé jako Staebler – Wronski efekt (dále jen SWE).

5.1 Staebler – Wronski efekt

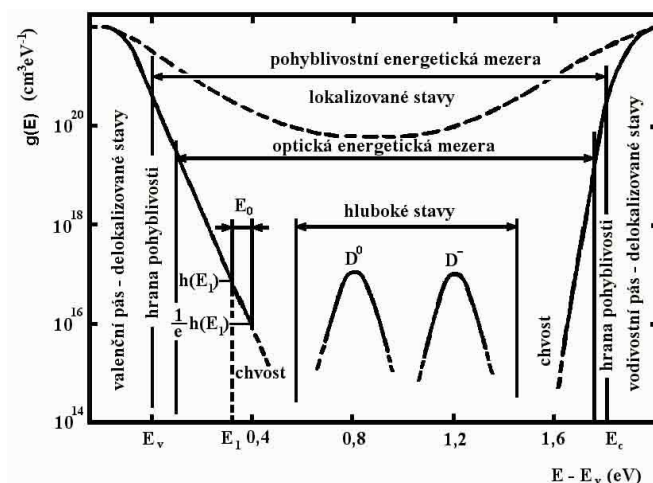
Účinnost tenkovrstvého článku z amorfního křemíku klesá během prvních šesti měsíců provozu. Tento pokles může být až o 30 % v závislosti na kvalitě materiálu a zvolené výrobní technologii článku. Po tomto rapidním počátečním poklesu se výkon ustálí na hodnotě deklarovanou výrobcem (nominální hodnota). Jinými slovy moduly a-Si:H dosáhnou svého ustáleného stavu cca po 1000 provozních hodinách při stabilním osvětlení. Průběh degradace jednovrstvého a třívrstvého článku je na Obr. 18.



Obr. 18: Pokles účinnosti v závislosti na čase vlivem SWE [7]

Tento nežádoucí jev poprvé popsali američtí vědci Staebler a Wronski roku 1977. Tato dvojice objevila, že proud za temna a fotovodivost u a-Si:H článků se může výrazně snížit působením intenzivního osvětlení. Dále také zjistili, že žháním materiálu za temna teplotou přesahující 150 °C lze tento efekt zvrátit (viz kapitola 6.6).

Koncentrace hlubokých stavů (Obr. 19) se v materiálu a-Si:H zvyšuje s rostoucí dobou expozice osvětleného článku, což vede ke zkrácení doby životnosti fotogenerovaných nosičů náboje, a tedy ke snížení účinnosti. Příčinou je tvorba nových rekombinačních center pro světlem generované elektrony a díry [18].

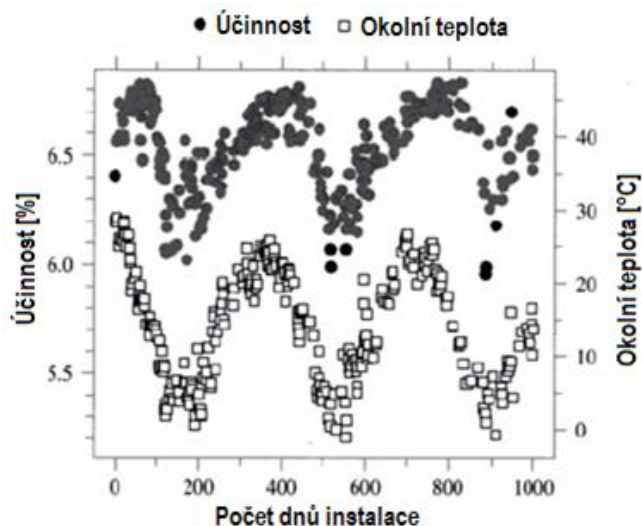


Obr. 19: Energetické rozložení hustoty stavů [18]

Předpokládá se, že osvětlení poskytuje potřebnou energii k vytlačení vazby vodíku, čímž vznikne nenasycená křemíková vazba. Staebler – Wronskiho efekt není stále ještě dostatečně popsán a prozkoumán. Jeho detailní pochopení by mohlo vést ke zlepšení současných depozičních technik a výsledkem by byly účinnější FV články.

5.2 Sezónní efekt

Experimenty prokázaly, že stabilizovaná účinnost amorfních článků je závislá na jejich teplotě během osvitu. Vystavení panelu vyšší teplotě mění rovnováhu mezi škodlivými účinky působení světla a příznivými účinky tepla, což vede, jak už bylo zmíněno k jeho vyšší efektivitě. Tento fakt vysvětluje známý sezónní efekt, kdy výkon pozitivně koreluje s denní průměrnou teplotou (Obr. 20). Zmiňovaný efekt má za následek relativní zvýšení výkon o 10 - 15 % během letní sezóny.



Obr. 20: Vzájemné korelace teploty a efektivy amorfního modulu [7]

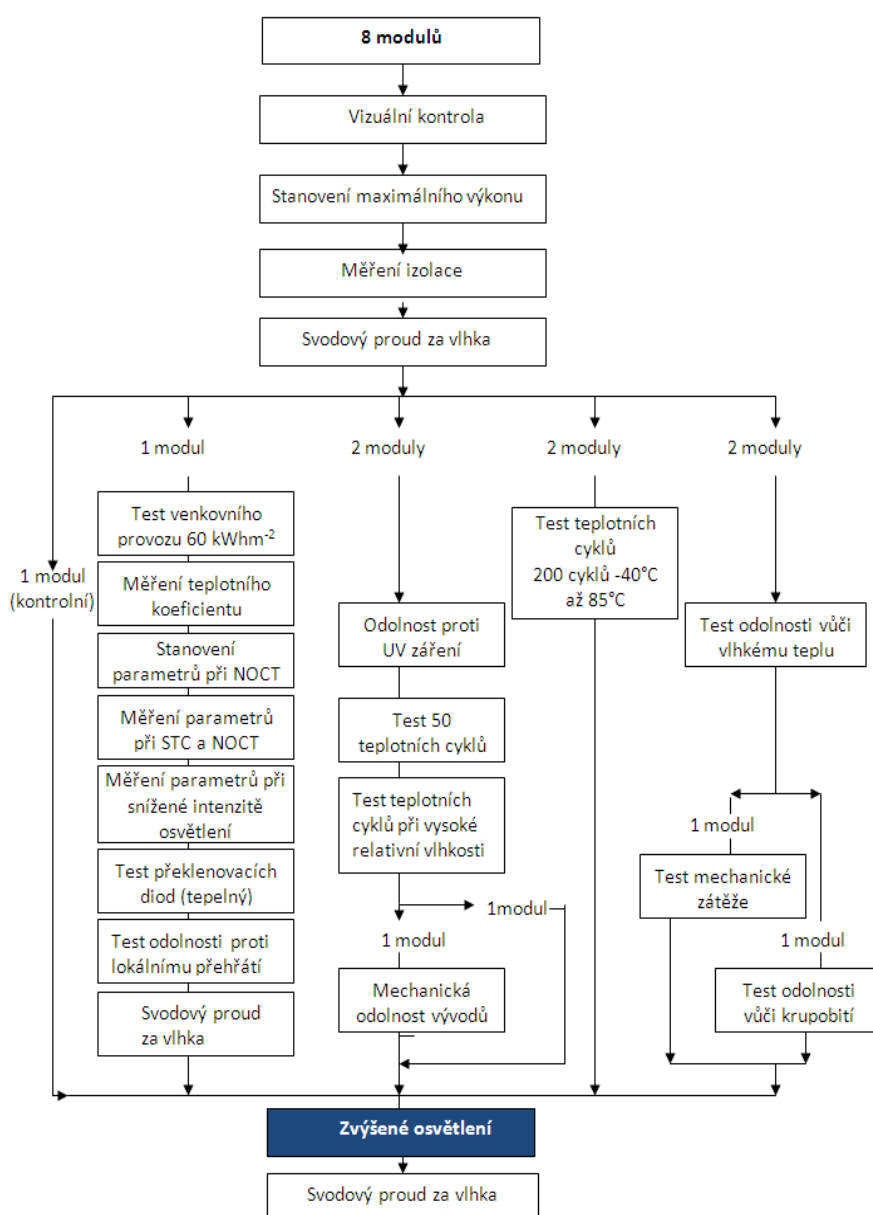
5.3 Metody potlačení Steabler – Wronskiho efektu

- Použití technologie na bázi mikro, nano-krystalického křemíku
- Použití technologie Multijunction (viz kapitola 2.1.1)
- Zmenšit tloušťku vrstvy
- Provozování článku při vyšší teplotě
- Integrace do tepelných hybridních solárních kolektorů, tzn. provoz při vyšších teplotách

6 TESTOVÁNÍ AMORFNÍCH PANELŮ

Celý proces testování osmi náhodně vybraných FV panelů musí proběhnout podle příslušných norem, které definují pravidla, postupy a požadavky na zařízení pro testování. Schéma průběhu testování tenkovrstvých panelů dle ČSN EN 61646 je zobrazeno na Obr. 21. Tato norma se zaměřuje výhradně na tenkovrstvé FV články. Ucelený přehled všech požadavků na FV články je definován normou ČSN EN 60904.

Smyslem této diplomové práce je popsat jeden z posledních kroků testu, kdy dochází k výkonovému ustálení a testování elektrických parametrů modulu. Jedná se o tzv. Light - soaking test, kdy je panel vystaven zvýšenému osvětlení. K provedení tohoto testu je nejdůležitějším prvkem sluneční simulátor, který je popsán v kapitole 6.1.



Obr. 21: Schéma procesu testování amorfního modulu dle ČSN EN 61646 [3]

6.1 Solární simulátory

Norma ČSN EN 60904 - 9 definuje spektrální a výkonnostní vlastnosti solárních simulátorů. Na základě výkonnostních charakteristik se simulátory rozdělují do jednotlivých tříd (A, B, C). Hodnocení simulátorů se provádí podle třech hlavních parametrů uvedené v Tab. 2. Výsledkem je tříčlenné hodnocení solárního simulátoru. V případě provádění Light - soaking testu stačí použít solární simulátor třídy CCC.

Tab. 2: Rozdělení solárních simulátorů

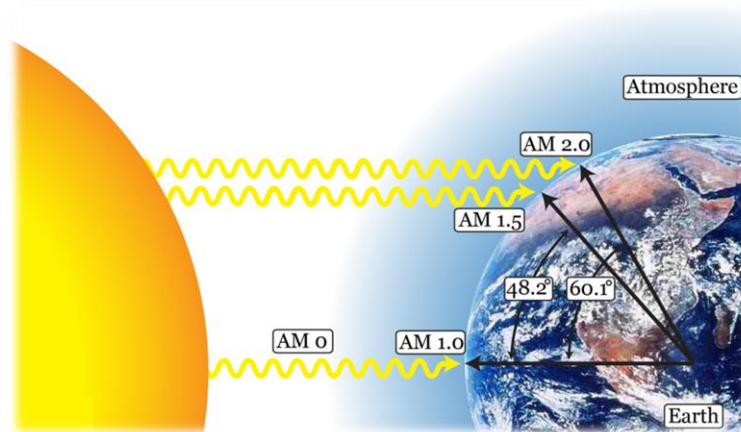
Třída	Spektrální shoda se slunečním zářením	Nerovnoměrnost ozářené plochy	Časová nestabilita ozařované plochy	
			Krátkodobá [%]	Dlouhodobá [%]
A	± 25	± 2	± 0,5	± 2
B	± 40	± 5	± 2	± 2
C	+100/-60	± 10	± 10	± 10

6.2 Standardní testovací podmínky STC

Po skončení Light - soaking testu je nezbytně nutné změřit elektrické vlastnosti panelu (viz kapitola 4) při STC podmínkách, což je základní test určující výkonnost panelu.

Parametry STC:

- teplota $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- intenzita slunečního záření $I = 1000\text{ W/m}^2$
- filtrace světla průchodu zemskou atmosférou $AM = 1,5$ (Obr. 22)



Obr. 22: Znázornění různých typů AM [11]

6.3 Light - soaking podle ČSN EN 61646

Norma nám definuje, jakým způsobem se má provádět test stabilizace elektrických vlastností amorfních článků prostřednictvím přirozeného nebo simulovaného slunečního záření.

Požadavky na měřicí zařízení

- a) Solární simulátor třídy CCC v souladu s IEC 60904 - 9 nebo zdroj přírodního záření.
- b) Vhodné referenční zařízení pro monitorování záření.
- c) Prostředky k upevnění modulů s referenčním zařízením podle doporučení výrobce.
- d) Prostředky pro měření teploty modulu s přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- e) Dostatečně velkou odporovou zátěž, aby mohly moduly pracovat v blízkosti bodu svého výkonového maxima.

Postup měření

- a) Připojíme odporovou zátěž k modulu dle doporučení výrobce a do stejné roviny jako referenční panel k simulátoru.
- b) Pokud používáme solární simulátor, použijeme referenční modul s nastaveným zářením mezi $600 - 1\,000\text{ W/m}^2$ a poté spustíme záření.
- c) Během simulace osvitů musí teplota modulu zůstat v rozsahu $50 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- d) Každý modul je vystaven záření po takovou dobu, dokud se nestabilizuje jeho maximální hodnota výkonu. Stabilizace výkonu nastává tehdy, když je při měření dvou po sobě jdoucích period splněna následující podmínka:

$$\frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{průměr}}} < 2\% \quad (1.5)$$

Parametry testu: alespoň 43 kWh.m^{-2} , stálá teplota mezi 40 a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, všechny střední hodnoty maximálního výkonu musí být změřeny při stálé teplotě modulu, která bude v rozsahu $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- e) Hodnoty jsou zaneseny do protokolu o zkoušce.

Závěrečné měření

Znovu se provede:

- optická kontrola
- měření izolace
- měření parametrů při STC a NOCT

Požadavky na splnění testu

- neprojeví se žádné vážné vizuální vady
- izolační odpor musí splňovat stejné parametry jako při počátečním měření modulu
- po provedení Light - soaking testu nesmí být maximální výkon změřený při STC menší jako 90 % hodnoty uváděný výrobcem

6.4 Light - soaking podle rozdílných norem

Způsoby, jak stabilizovat výkon amorfního článku, se mohou lišit. V Tab. 3 jsou jako příklad uvedeny kritéria Light-soaking testu v USA a Japonsku.

Tab. 3: Kritéria Light - soaking testu v různých zemích

		USA	Japonsko
Doba osvitu	[hod]	600	310
Intenzita záření	[W/m ²]	1000	1250
Okolní teplota	[°C]	50	48
Připojení zátěže	[-]	ANO	ANO

Z Tab. 3 nám vyplývá, že tento test je vhodnou kombinací současného působení teploty, intenzity záření a času. Zvolené hodnoty jsou založeny na dlouhodobém zkoumání vlastností amorfních článků a v některých případech si samotní výrobci definovali vlastní postupy (kapitola 6.5), které jsou ekvivalentní k postupům v normách. Panel ve všech případech dosáhne na svoji nominální hodnotu výkonu garantovanou výrobcem.

6.5 Light - soaking podle Mitsubishi

Jeden z předních výrobců amorfních článků Mitsubishi (MHI) definoval svoji vlastní měřicí proceduru, která je ekvivalentní s Light - soaking testem dle ČSN EN 61646. Japonský výrobce ji zavedl kvůli její menší časové náročnosti. Postup podle MHI bude sloužit jako jeden z návodů pro praktickou část diplomové práce.

6.5.1 Zavedené definice MHI

Měření v polních podmínkách

P_{MAX} změřené v polních podmínkách je považováno jako referenční údaj, protože je P_{MAX} definováno jako maximální výstupní výkon při STC. Maximální výkon musí být měřen kalibrovaným simulátorem podle referenčního modulu se standardním světelným spektrem, intenzitou záření a teplotou.

Změny P_{MAX} v polních podmínkách

Maximální výkon se mění v závislosti na teplotě a intenzitě záření dopadající na modul. Teplota modulu je ovlivněna typem instalace, podnebím a ročním obdobím. Výsledná data jsou použita pouze jako referenční.

Ideální měřicí procedura dle ČSN EN 61646

V prvé řadě se musí panel uvést do počátečních podmínek, aby bylo zamezeno vlivu teploty a intenzity záření, kterým byl vystaven panel v polních podmínkách. Dále se provede Light - soaking test, jelikož ustálené hodnoty P_{MAX} se měří až po tomto stabilizačním testu. Po provedení všech testů je měření P_{MAX} provedeno pomocí solárního simulátoru při STC.

Průběh testu dle ČSN EN 61646

- a) čas k inicializaci modulu při teplotě 150 °C je cca 60 hodin
- b) čas k inicializaci modulu při teplotě 86 °C je cca 2 600 hodin
- c) čas ke stabilizaci výkonu podle Light - soaking testu je cca 200 hodin

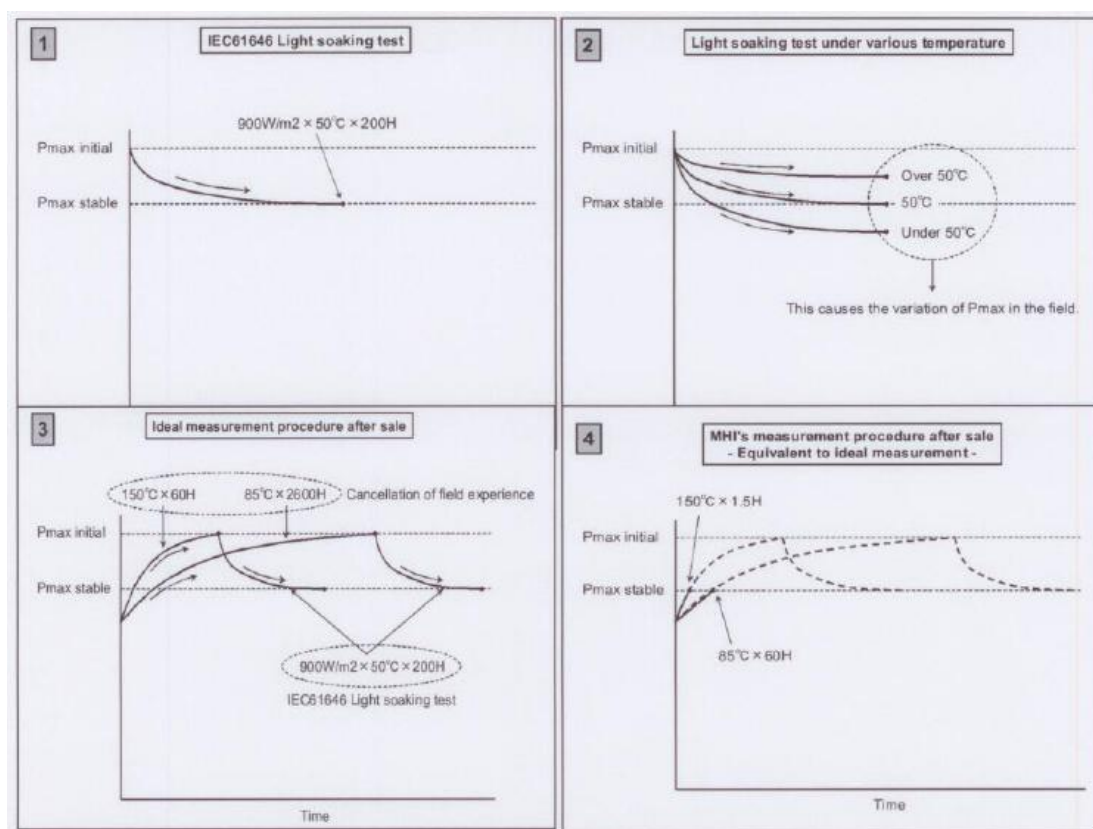
Měřicí procedura podle MHI

Výše zmíněné procedury jsou časově náročné. MHI navrhla časově úspornější, které jsou totožné jako kombinace: a) + c) nebo b) + c).

- 1) Po skončení žíhání teplotou 150 °C po dobu 90 minut se modul měří pomocí solárního simulátoru dle STC (zahrnuje čas potřebný pro zahřátí a chladnutí). Test zahrnuje žíhání modulu teplotou převyšující 85 °C, která je zároveň nejvyšší pracovní teplotou modulu. V tomto případě je testovaný modul zničen a nelze ho použít pro další měření.
- 2) Po skončení žíhání teplotou 85 °C po dobu 60 hodin je modul měřen pomocí solárního simulátoru dle STC (zahrnuje čas potřebný pro zahřátí a chladnutí).

Stabilizovaná hodnota P_{MAX} je podle MHI určena měřením při STC po provedení Light - soaking testu. Pokud se měření STC provádí na modulu branného z polních podmínek, tak se žíhání nebo Light - soaking test provede před měřením STC.

Průběh Light - soaking testu dle ČSN EN 61646, teplotních charakteristik, ideální měřicí procedury a procedury dle MHI jsou graficky zobrazeny na Obr. 23.



Obr. 23: Přehled měřících procedur dle MHI a ČSN EN 61646 [3]

Legenda k Obr. 23:

1. Light - soaking test dle ČSN EN 61646
2. Light - soaking test prováděný za různých teplot
3. Ideální postup pro ustálení výkonu panelu
4. Postup dle MHI pro ustálení výkonu panelu

6.6 Žíhání

Jedná se o technologický proces, při němž je FV panel vystaven vysokým teplotám. Žíhání se provádí za tmy v inertní atmosféře nebo vakuu při teplotách 150 °C. Po skončení žíhání je velice důležité sledovat rychlosti chladnutí vzorku. Doporučuje se ochlazení 2 °C / min, aby se předešlo teplotnímu stresu a vzniku defektů.

Během žíhání dochází k opačnému ději jako u SWE. Začneme-li žíhat amorfní panel, začne se regenerovat a dochází k jeho návratu do svého počátečního stavu (před degradací vlivem osvětlení). Jeho výkon opět vzroste.

Žíhání tenkovrstvých modulů se provádí před podrobením kvalifikačních zkoušek modulu. Kdyby nebylo provedeno žíhání, mohl by z jiných příčin ohřev modulu při následné zkoušce maskovat degradaci.

Žíhání se provádí vždy:

- PO Light - soaking testu a UV testu.
- PŘED a) Testem teplotních testů při vysoké relativní vlhkosti.
b) Testu odolnosti vůči vlhkému teplu.

7 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce spočívala v testování elektrických parametrů amorfních FV článků, které byly ponechány působení degradačních a regeneračních mechanismů způsobujících výkonové změny.

Měření bylo provedeno na třech kusech nových amorfních článků stejného typu (kapitola 7.2.1), které byly následně vystaveny třem typům mechanismů ovlivňující UI charakteristiku článků.

- a) light - soaking test
- b) přirozené sluneční záření
- c) konstantní proud za temna protékající článkem

Poslední zmíněná metoda je pouze hypotéza. Základním předpokladem je, že průchod konstantního proudu článkem za temna způsobí stejný efekt, jako žíhání článku tzn., dojde k nárůstu výkonu na počáteční hodnotu. Tento předpoklad nebyl podložen jinými výsledky, takže nebylo dopředu možné určit povahu měření.

Jedním z cílů diplomové práce je vyhodnotit vliv protékajícího proudu za temna na elektrické vlastnosti amorfního článku a určit zda je tento vliv degradačního nebo regeneračního charakteru. Dalším účelem bylo zjistit, zda lze výkonově stabilizovat amorfní FV články pomocí běžně dostupných zařízení v laboratořích obnovitelných zdrojů na VUT.

Měření bylo rozděleno do několika etap, v nichž v každé se pracuje s určitou hypotézou, jak by se článek měl chovat. Podle průběžných výsledků se musely měnit navržené postupy, které se stanovily na počátku celého měření.

7.1 Etapy měření

Celý proces měření a testování elektrických parametrů amorfních článků se skládal z několika etap, které měly svoji určitou návaznost. Následující popis jednotlivých etap je pouze stručné shrnutí, jak se postupovalo při měření. Detailní popis jednotlivých metod je uveden v dalších kapitolách diplomové práce. Celý proces měření byl započat v druhé polovině Února a skončen v první polovině Května.

Etapa 1

Změření výchozích UI charakteristik článků SO26 1SC1

Všechny tři nové amorfní články byly proměřeny pomocí flash testeru Pasan. Tímto krokem byly zjištěny počáteční hodnoty elektrických parametrů článků, které slouží jako referenční hodnoty.

Etapa 2a

1. cyklus degradace – prvních 200 hodin

Články číslo II a III byly ponechány působení degradačních mechanismů po stejnou dobu, aby bylo poté možné průběžně srovnávat výsledky obou metod (dle ČSN EN 61646 Obr. 23 - 1). Průběžné měření IV charakteristik.

- Článek č. II – podrobení Light – soaking testu
- Článek č. III – působení konstantního proudu za temna

Etapa 2b

Degradace přirozeným slunečním zářením

Článek č. I byl ponechán ve venkovních podmínkách nezávisle na testovaných článcích č. II a III. Průběžné měření IV charakteristik.

Etapa 3

2. cyklus degradace – druhých 200 hodin

Výsledky neodpovídaly dle očekávání, proto byl proveden další test. Průběžné měření IV charakteristik.

- Článek č. II – podrobení Light – soaking testu
- Článek č. III – působení konstantního proudu za temna

Etapa 4

Žihání

Články č. II a III byly vloženy do laboratorní tepelné komory a ponechány normou definovanou dobu, aby došlo k výkonové regeneraci. Změření IV charakteristik.

Etapa 5

Degradace přirozeným slunečním zářením

Články degradované Light – soaking testem a metodou konstantního proudu za temna byly umístěny do venkovních podmínek a ponechány vlivu přirozeného záření. Změření IV charakteristik.

Etapa 6

Působení konstantního proudu za temna na jiný amorfní panel

FV panel EPV-50 byl ponechán vlivu konstantního proudu za temna. Ponecháno vlivu více úrovní hodnoty konstantního proudu. Změření IV charakteristik.

Etapa 7

Sundání článků č. I, II a III z venkovních podmínek. Změření IV charakteristik. Srovnání a vyhodnocení všech naměřených výsledků.

7.2 Parametry měřených amorfních panelů

7.2.1 SO26 1SC1

Jedná se o jednovrstvý amorfní FV panel od neznámého výrobce, který má velmi nízký výkon vzhledem k jeho malým rozměrům (Obr. 24). Právě rozměry byly rozhodujícím faktorem pro výběr tohoto typu panelu, aby jej bylo možné umístit do laboratorní tepelné komory a provést jeho žíhání. Článek je ohebný a zalitý v polymeru, který zajišťuje jeho ochranu proti vnějším klimatickým činitelům. Elektrické parametry jsou uvedeny v Tab. 4. Pro účely této diplomové práce byly zakoupeny tři nové články stejného typu.

Tab. 4: Elektrické parametry panelu SO26 1SC1

Parametr	Jednotka	Hodnota
P_{MPP}	[W]	0,45
U_{MPP}	[V]	1,50
U_{OC}	[V]	2,50
I_{MPP}	[mA]	300
I_{SC}	[mA]	430



Obr. 24: Amorfní článek SO 26 1SC1

Volba zátěže

FV panel nebo článek musí mít pro svoji řádnou funkci připojenou dostatečně velkou zátěž, která byla v našem případě zastoupena výkonným odporem zobrazeným na Obr. 25. Článek je tedy po připojení a vystavení slunečnímu záření schopen pracovat v okolí svého maximálního výkonu (P_{mpp}). Výpočet odporu zátěže v maximálním bodě výkonu byl proveden podle vzorce 1.6.

$$R_Z = \frac{U_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{1,5 \text{ V}}{0,3 \text{ A}} = 5 \Omega \quad (1.6)$$

Z důvodu rezervy byl vybrán odpor o velikosti 5,6 Ω z řady E12 s těmito technickými parametry:

- Provedení: Metaloxidový
- Odpor: $R = 5,6 \Omega$
- Příkon: $P_Z = 2 \text{ W}$
- Tolerance 5 %
- Teplotní koeficient: $TK = 300 \text{ ppm/K}$



Obr. 25: Odpor 5R6

7.2.2 EPV SOLAR EVP-50

Dalším typem testovaného jednovrstvého amorfního panelu byl panel od výrobce EPV SOLAR (obr. 26), který měl zcela odlišnou konstrukci a rozměry ve srovnání s předešlým typem. Přední i zadní strana panelu je tvořena z vysoce stabilního a pevného skla, takže se již nejedná o ohebný panel. Testovaný panel byl častokrát používán v laboratořích obnovitelných zdrojů VUT v Brně nebo vystaven přímému slunečnímu záření, avšak v posledních několika letech byl ponechán pouze v laboratoři bez připojené zátěže. Vycházeli jsme z předpokladu, že panel je ve svém ustáleném výkonovém stavu, jelikož byl v minulosti vystaven po velice dlouhou dobu slunečnímu záření. Elektrické parametry panelu jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.



EPV SOLAR IEC 61646 MODEL EPV50 SERIAL # 834303-07 DATE 1-2009		
PARAMETERS	MEASURED	RATED
POWER (max., W)	56.80 W	50.00 W
VOLTAGE (oc, V)	62.57 V	60.00 V
VOLTAGE (Pmax, V)	46.33 V	45.00 V
CURRENT (sc, A)	1.529 A	1.410 A
CURRENT (Pmax, A)	1.226 A	1.120 A

RATED AT STC (1000 W/m², AM 1.5, CELL T 25°C)
 AT 800 W/m², AM 1.5, CELL T 48.1°C, P MAX IS 37.7 W
 COPPER ONLY FIELD CONNECTIONS
 USING 10-15 AWG@90°C MIN INSULATION
 MAXIMUM SYSTEM VOLTAGE 1000V
 SERIES FUSE 40A
 MINIMUM BYPASS DIODE IF = 3.0 A
 FIRE RATING CLASS C
 MFG CODE G1
 MADE IN GERMANY

Obr. 26: Amorfni panel EPV-50 a jeho štítek

Tab. 5: Elektrické parametry panelu EPV 50

Parametr	Jednotka	Hodnota
P_{MPP}	[W]	50
U_{MPP}	[V]	45
U_{OC}	[V]	60
I_{MPP}	[A]	1,12
I_{SC}	[A]	1,41

7.3 Metoda měření IV charakteristik

Jednou ze základních a nejpresnějších laboratorních metod měření kompletních IV charakteristik FV článku je tzv. Flash test. Každý panel by měl absolvovat minimálně jedno měření Flash testerem (první měření hned po jeho výrobě, jelikož lze velice jednoduše detekovat výrobní defekty a prokázat zda panel odpovídá parametrům deklarovaných výrobcem).

Měření IV charakteristik bylo provedeno v laboratorních podmínkách pomocí Flash testeru Sun Sim 3C od švýcarské firmy PASAN, který splňuje nejpřísnější třídu přesnosti A+/A+/A+. Podrobné vysvětlení tříd přesnosti solárních simulátorů je uvedeno v kapitole 6.1. V našem případě bylo zapotřebí měřicí zařízení s velmi vysokou třídou přesnosti, jelikož byly měřeny články s velmi nízkým výkonem a v neposlední řadě jsme předem nevěděli charakter změn elektrických parametrů. V současnosti Flash tester PASAN patří k nejmodernějším na trhu. Na Obr. 27 je uvedeno blokové schéma flash testeru a měřicí pracoviště. UI charakteristiky článku se měří při normou definovaných standardních podmínkách STC popsané v kapitole 6.2, čímž jsou zajištěny naprosto totožné podmínky pro každé provedené měření.

Samotný Flash tester je složen z jednotlivých částí:

a) Světelný zdroj

- speciální xenonové nebo halogenové žárovka, které simulují viditelné spektrum slunečního záření
- homogenní světelné svazky paprsků dopadají kolmo na testovaný panel
- generuje přesně definované impulsy záblesků (využívá se pulzního módu osvětlení - záblesku)
- jedno pulzní zdroj SLP (doba trvání záblesku 10 – 100 ms během které se vykreslí celá UI charakteristika)
- více pulzní zdroj MLP (doba trvání záblesku 1 ms a pro vykreslení celé UI charakteristiky je potřeba 100 záblesků)

b) Referenční článek

- kalibrovaný článek zajišťující správné nastavení optimálního ozáření

c) Teplotní senzor

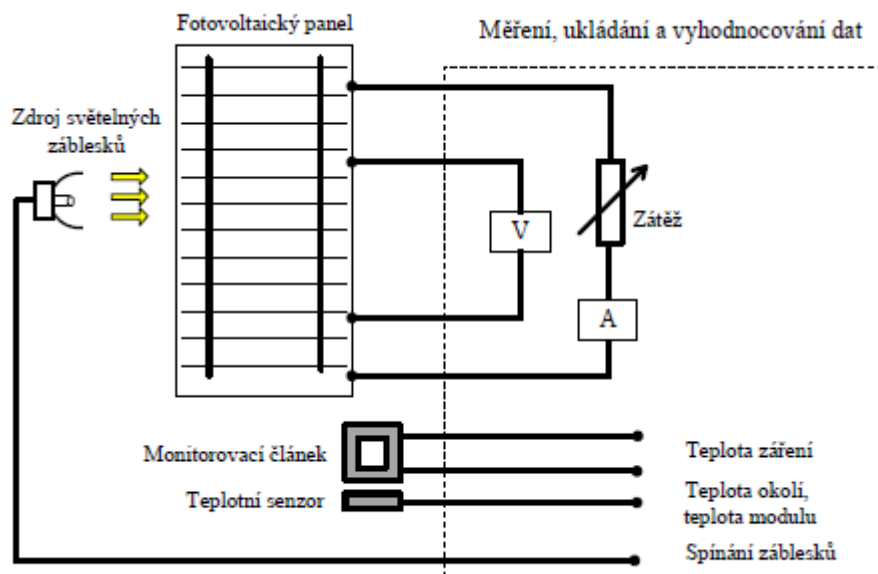
- poskytuje informaci o aktuální teplotě komoře

d) Výkonová zátěž

- sleduje odezvu testovaného FV modulu během světelných impulsu. Regulace probíhá automaticky na základě počáteční kalibrace referenčního modulu.

e) PC

- shromažďuje, ukládá a vyhodnocuje kompletní IV charakteristiku z naměřených dat



Obr. 27: Měřící pracoviště FLASH testeru (horní obrázek) a jeho blokové schéma [20]

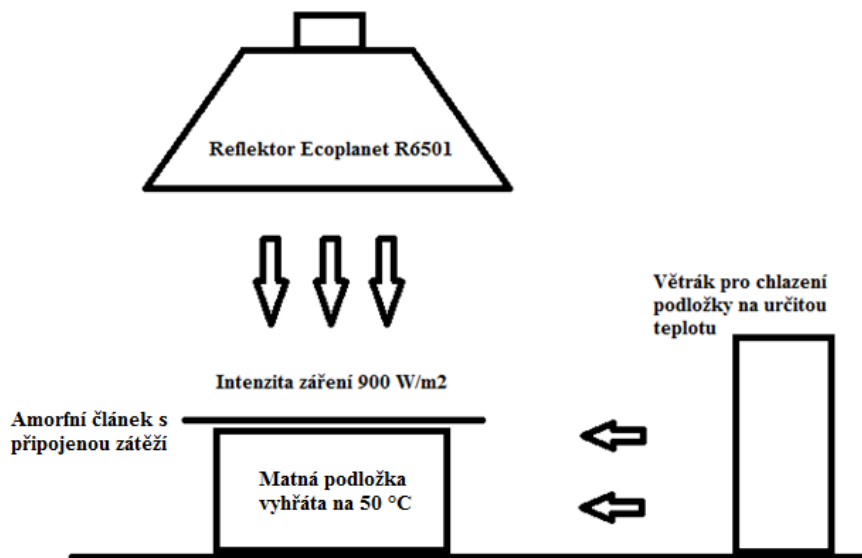
7.4 Light - soaking test

Jednou z podmínek normy ČSN EN 61646 jsou požadavky na měřicí vybavení určeného pro tzv. Light - soaking test. Podle normy musí být proveden Light - soaking test pomocí solárního simulátoru dosahující alespoň třídy CCC, aby došlo k výkonovému ustálení solárního článku. V našem případě nebyl tento simulátor použit z následujících důvodů:

- Laboratoře obnovitelných zdrojů nejsou vybaveny tímto typem simulátoru
- Najít jiný způsob výkonové stabilizace FV článku pomocí zdroje záření, který je dostupný v laboratořích obnovitelných zdrojů

7.4.1 Popis metody

Norma ČSN EN 61646 definuje pravidla, postupy a požadavky na zařízení pro Light - soaking test (viz kapitola 6.3). Všechny výše zmíněné požadavky byly dodrženy s tím rozdílem, že místo solárního simulátoru typu CCC byl použit laboratorní reflektor s halogenovou žárovkou. Měřicí pracoviště zobrazené na Obr. 28 se skládá z reflektoru, tmavé matné podložky, ventilátoru a testovaného amorfního článku s připojenou zátěží.



Obr. 28: Uspořádání měřicího pracoviště pro Light - soaking test



Obr. 29: Experimentální pracoviště pro Light – soaking test

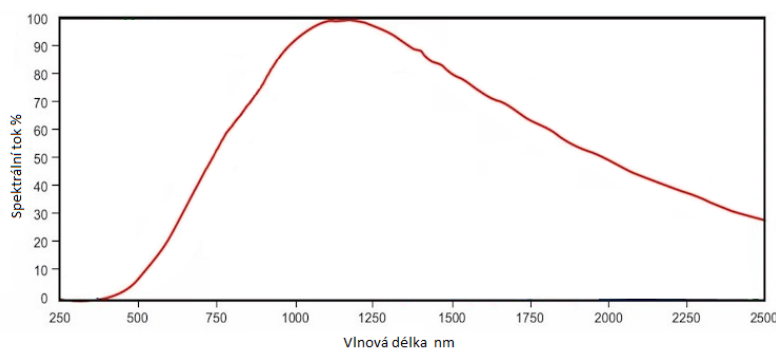
Halogenový reflektor

Light - soaking test byl proveden pomocí reflektoru Ecoplanet R6501 s lineární halogenovou zářivkou KANLUX o výkonu 500 W (Obr. 30). Jedná se o běžně komerčně využívaný reflektor s nízkými provozními i pořizovacími náklady.

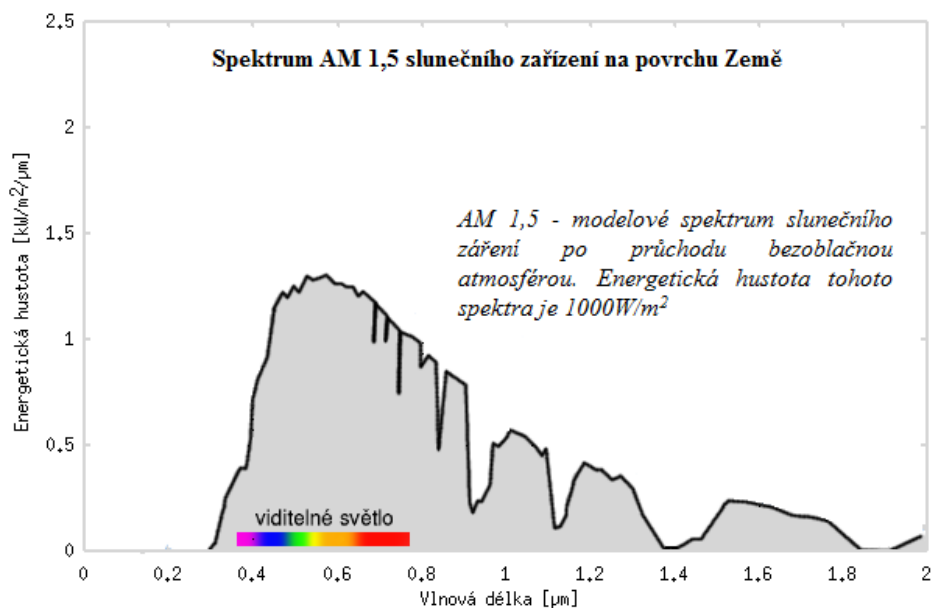
Vycházeli jsme z předpokladu, že lineární halogenové žárovky můžeme považovat za ekvivalent k slunečnímu simulátoru typu CCC. Vyzařované spektrum klasické halogenové žárovky je zobrazeno na Obr. 30, zatímco na Obr. 31 je zobrazeno spektrum přirozeného slunečního záření na povrchu Země korespondující s vyzařovacím spektrem použité halogenové žárovky. Reflektory tohoto typu jsou běžně používané jako simulátory slunečního záření, jak v laboratořích VUT tak i u samotných výrobců FV panelů.

Parametry lineární halogenové žárovky KANLUX:

- Výkon: $P = 500 \text{ W}$
- Světelný tok: 7600 lm
- Životnost = 1200 hod



Obr. 30: Vyzařovací spektrum použité lineární halogenové žárovky [23]



Obr. 31: Spektrum slunečního záření na povrchu Země [22]

7.4.2 Kontrolní měřicí metody

Intenzita záření

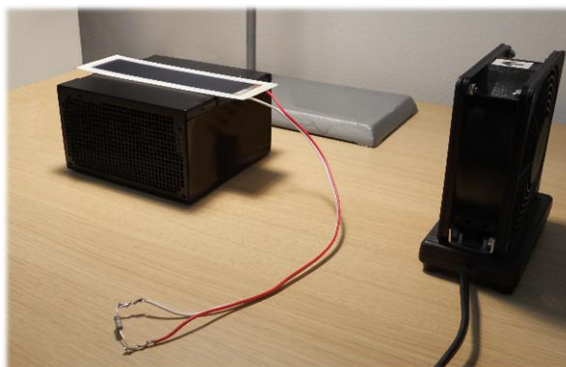
Norma ČSN EN 61646 dále také definuje intenzitu záření potřebnou pro Light – soaking test. V našem případě musel být reflektor vzdálený od podložky 38,8 cm, aby byla zachována hodnota intenzity záření cca 900W/m^2 .

Intenzita dopadajícího záření na celém povrchu podložky byla změřena pomocí expozimetru SPM – 1116SD zobrazeného na Obr. 32.



Obr. 32: Zařízení pro měření intenzity osvětlení [21]

Poloha podložky byla vycentrována vzhledem k poloze reflektoru takovým způsobem, že na jejím středu byla v daný okamžik naměřena nejvyšší intenzita záření. Reflektor Ecoplanet R6501 nebyl schopen generovat stejnou intenzitu záření ve všech místech podložky. Obr. 34 zobrazuje rozložení intenzity osvětlení na povrchu podložky. Za referenční hodnotu je považována intenzita osvětlení ve středu podložky a zobrazené údaje v okolí reprezentují poměrný výkon v % vzhledem k referenční hodnotě 905 W/m^2 . Z Obr. 34 je patrné, že intenzita osvětlení klesá směrem od středu ke krajům až o 10 %. Umístění amorfního článku bylo provedeno podle Obr. 33.



Obr. 33: Umístění amorfního článku na podložce

Příklad výpočtu pro pravý horní roh, kde byla zjištěna intenzita osvětlení 805 W/m^2 :

$$\text{poměrný výkon} = \frac{805}{905} \cdot 100 = 88,95 \% \doteq 89 \% \quad (1.7)$$

	92%	93%	95%	92%	89%		
	94%	97%	98%	95%	91%		
Amorfni panel			99%				
	93%	96%	98%	Referenční pole 905 W/m ²	98%	94%	90%
			94%				
	83%	85%		85%	80%		
			77%				
	78%	80%	83%	78%	75%		

Obr. 34: Rozložení intenzity osvětlení na povrchu podložky a umístění amorfního článku

Kontrola teploty

Poslední nutnou podmínkou definující norma ČSN EN 61464 je dodržení konstantní teploty článku během Light – soaking testu. Norma říká, že během simulace osvětlení musí teplota modulu zůstat v rozsahu 50 ± 10 °C.

Jelikož byla v našem případě použita halogenová žárovka, která vyzařuje velkou část spektra v IR oblasti, docházelo k nadměrnému ohřívání podložky na vysokou teplotu. Z tohoto důvodu byl do systému zařazen ventilátor zajišťující chlazení na požadovanou teplotu. Podložka byla použita proto, že se jedná o černý matný kovový povrch pohlcující velmi dobře teplo, takže bylo vyřešeno dobré prohřátí článku z obou stran. Teplota byla změřena pomocí dvou metod, kvůli zpětné kontrole.

a) kontaktní (primární)

K multimetru DT – 830C byl připojen termočlánek typu K, (chromel-alumel), který je schopný měřit teploty v rozsahu 200 – 1250 °C. Tento typ článku měří s přesností ± 3 °C.



Obr. 35: Měření teploty povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou

b) bezkontaktní metody (sekundární)

Jednalo se o měření pomocí termokamery sloužící pouze jako kontrola, zda termočlánek poskytuje přesné údaje. Termografické měření provedené kamerou FLIR i7 je méně přesné než kontaktní měření, protože do výpočtu výsledné teploty povrchu vstupuje celá řada proměnných ovlivňující výsledek (emisivita, odražené teplo, vzdálenost, okolní teplota). Kamera FLIR i7 patří do nižších modelových řad, proto jsou některé hodnoty přednastavené. Nejdůležitější parametry jako emisivity povrchu a odražená teplota bylo však možné nastavit. Černá matná podložka je ideální volbou pro určení teploty povrchu pomocí termokamery, jelikož emisivity povrchu se blíží 1 a nedochází zde k odrazům jiných předmětů. Na Obr. 35 je vidět srovnání teplot změřené kontaktní (46 °C) a bezkontaktní (47,1 °C) metodou.

7.4.3 Naměřená data

V Tab. 6 je uveden počáteční stav amorfního článku č. II. Na Obr. 36 – 38 jsou zobrazeny UI charakteristiky a elektrické parametry článku po určité době degradace.

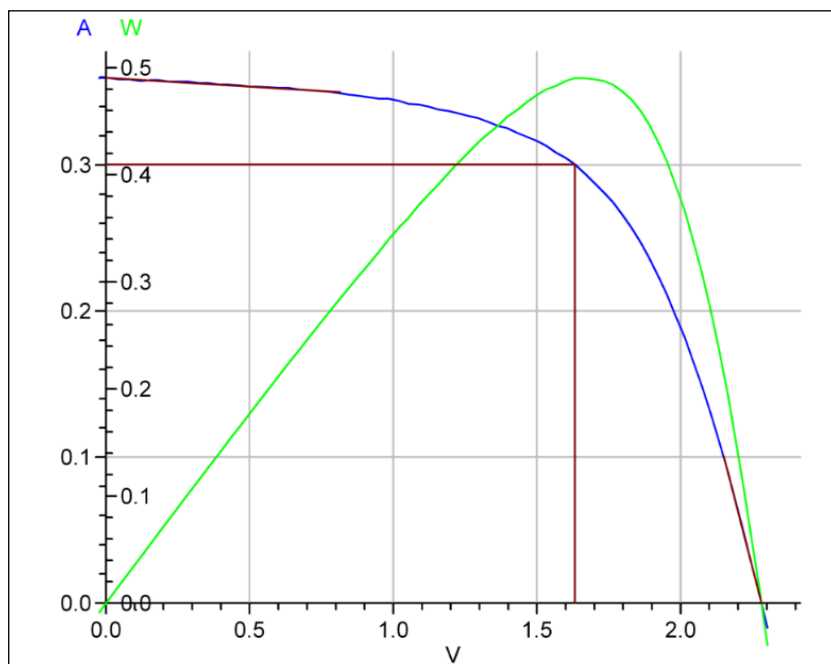
Počáteční stav článku

Tab. 6: Elektrické parametry článku číslo II

I_{sc}	A	0,362
U_{oc}	V	2,287
Eff	%	4,160
FF	%	60,38
P_{mpp}	W	0,499
U_{mpp}	V	1,666
I_{mpp}	A	0,300
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	87,50

1. Cyklus měření

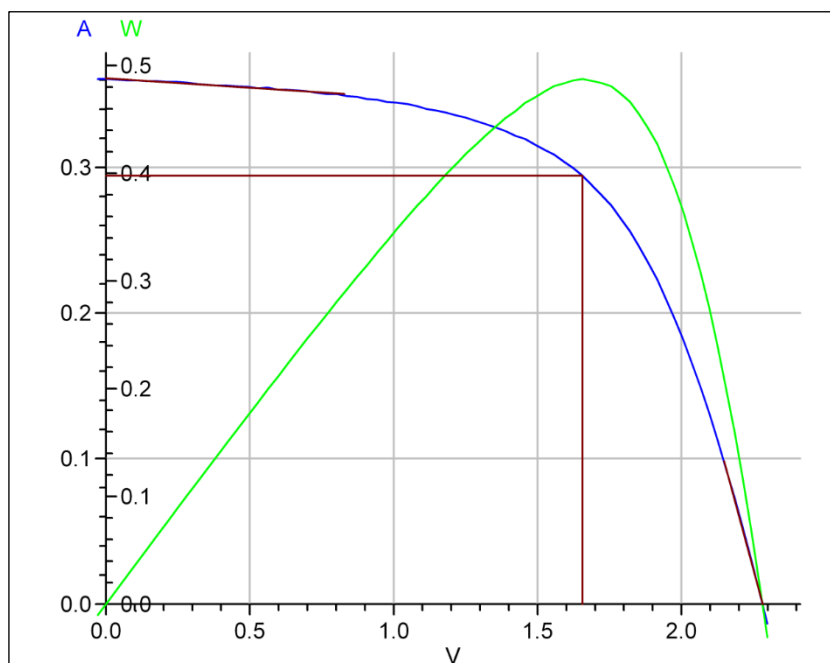
I_{sc}	A	0,360
U_{oc}	V	2,281
Eff	%	4,090
FF	%	59,73
P_{mpp}	W	0,490
U_{mpp}	V	1,632
I_{mpp}	A	0,300
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	82,30



Obr. 36: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 100 hodinách

2. Cyklus měření

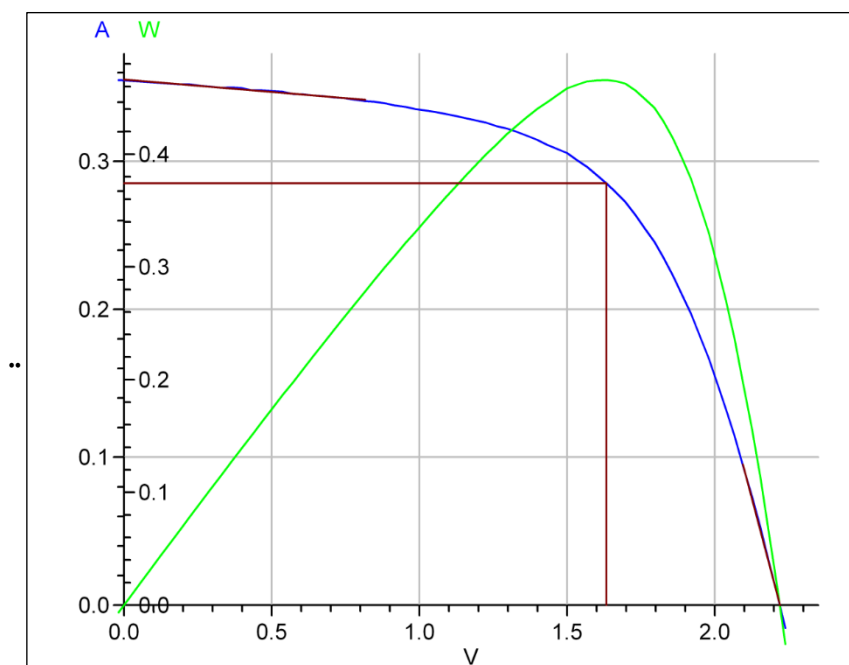
I_{sc}	A	0,361
U_{oc}	V	2,283
Eff	%	4,060
FF	%	59,12
P_{mpp}	W	0,487
U_{mpp}	V	1,657
I_{mpp}	A	0,294
R_{ser}	Ω	1,400
R_{sh}	Ω	76,50



Obr. 37: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 200 hodinách

3. Cyklus měření

I_{sc}	A	0,358
U_{oc}	V	2,264
Eff	%	4,000
FF	%	59,20
P_{mpp}	W	0,480
U_{mpp}	V	1,665
I_{mpp}	A	0,228
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	74,20



Obr. 38: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 400 hodinách

7.5 Konstantní proud za temna

Měření bylo provedeno na dvou typech amorfních panelů, abychom dostali více hodnot pro vyhodnocení metody. V první fázi měření se uvažovalo pouze o testování amorfního článku SO26 1SC1, avšak v průběhu letního semestru se naskytla možnost provést měření i na amorfním panelu EPV-50, který byl zapůjčen z laboratoří obnovitelných zdrojů. Tímto bylo možné sledovat vliv proudu i na klasickém amorfním panelu, který má cca 10x vyšší výstupní výkon. Výsledky měření prokáží, zda se jedná o regenerační nebo degenerační metodu.

7.5.1 Popis metody

Zastíněný článek zapojený v propustném směru byl připojen ke zdroji stejnosměrného napětí a ponechán vlivu protékajícího konstantního proudu po stanovenou dobu (Obr. 40). Schéma zapojení je na Obr. 39. Zamezení osvětlení fotocitlivé vrstvy bylo zajištěno pomocí tvrzeného papíru, který obklopoval testovaný článek ze všech stran. V průběhu měření byla také monitorována teplota článku s tím, že okolní teplota v laboratoři byla v rozmezí 20 – 25 °C. Po stanovených intervalech byly změřeny elektrické parametry článku.



Obr. 39: Schéma zapojení

7.5.2 Naměřená data

V Tab. 7 a Tab. 8 je uveden počáteční stav amorfního článku č. II, respektive panelu EPV-50. Na Obr. 41 – 45 jsou zobrazeny UI charakteristiky a elektrické parametry článků po určité době degradace.

a) Článek č. III

Velikost stejnosměrného proudu byla regulována pomocí výstupního napětí zdroje. Hodnota napětí byla blízká $U_{OC} = 2,5 \text{ V}$, což odpovídalo velikosti protékajícího proudu přibližně 400 mA ($I_{SC} = 430 \text{ mA}$). Článek byl záměrně přetížen na výsledný výkon 1 W. Vlivem protékajícího proudu docházelo k ohřívání článku a jeho průměrná teplota se ustálila na hodnotě pohybující se kolem 40 °C.



Obr. 40: Zastíněný amorfnní článěk připojený ke zdroji proudu

Počáteční stav článku

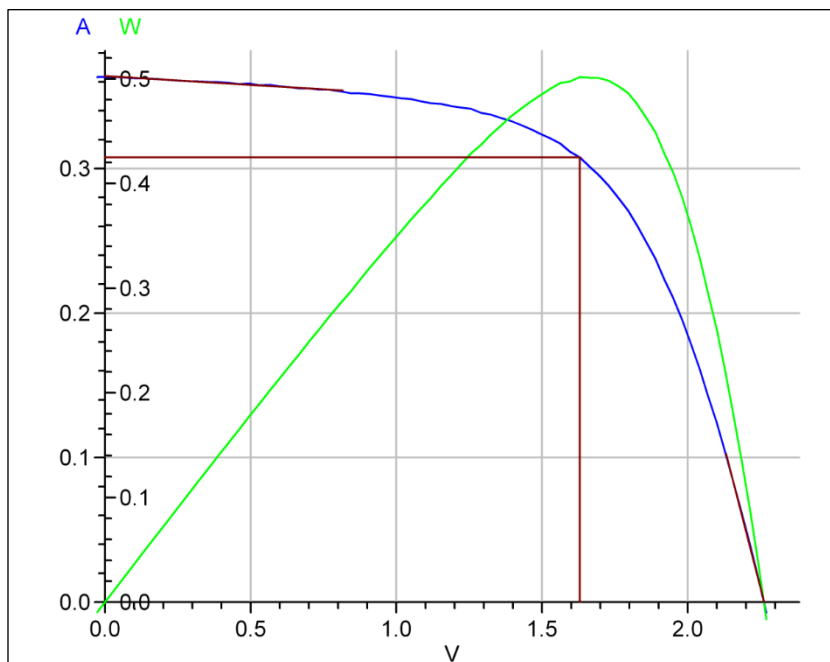
Tab. 7: Elektrické parametry článku č. III

I_{sc}	A	0,365
U_{oc}	V	2,285
Eff	%	4,370
FF	%	62,94
P_{mpp}	W	0,525
U_{mpp}	V	1,699
I_{mpp}	A	0,309
R_{ser}	Ω	1,200
R_{sh}	Ω	100,1

1. Cyklus měření

Velikost konstantního proudu $I = 400 \text{ mA}$

I_{sc}	A	0,364
U_{oc}	V	2,263
Eff	%	4,180
FF	%	60,91
P_{mpp}	W	0,502
U_{mpp}	V	1,630
I_{mpp}	A	0,308
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	81,70

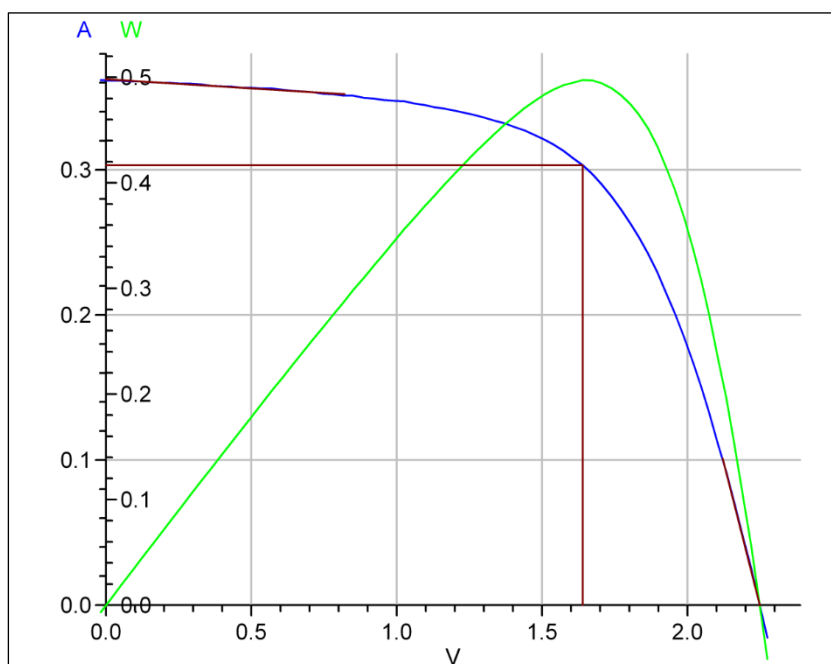


Obr. 41: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 100 hodinách

2. Cyklus měření

Velikost konstantního proudu $I = 400 \text{ mA}$

I_{sc}	A	0,362
U_{oc}	V	2,249
Eff	%	4,140
FF	%	61,03
P_{mpp}	W	0,497
U_{mpp}	V	1,640
I_{mpp}	A	0,303
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	80,00

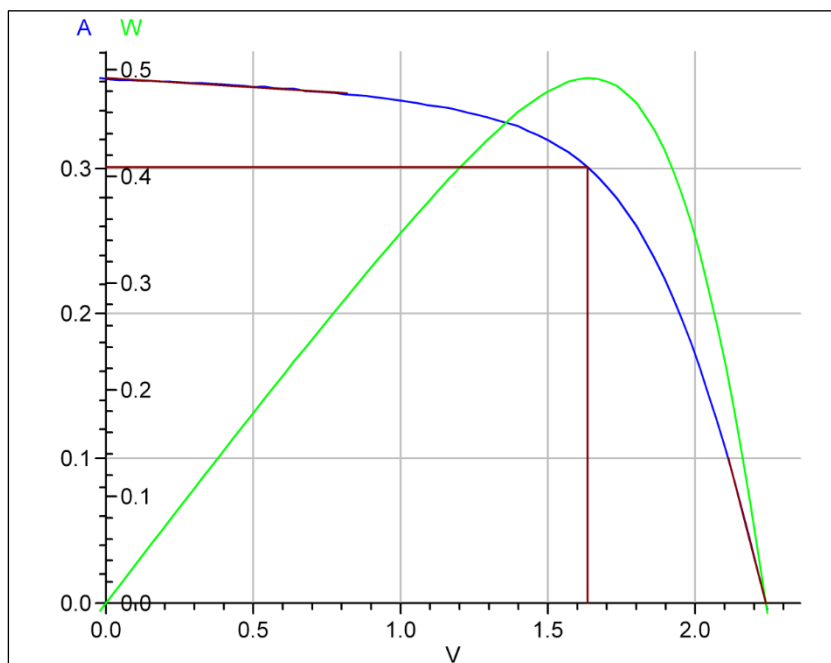


Obr. 42: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 200 hodinách

3. Cyklus měření

Velikost konstantního proudu $I = 400 \text{ mA}$

I_{sc}	A	0,363
U_{oc}	V	2,240
Eff	%	4,100
FF	%	60,59
P_{mpp}	W	0,492
U_{mpp}	V	1,635
I_{mpp}	A	0,301
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	78,60



Obr. 43: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 400 hodinách

b) Panel EPV-50

Schéma zapojení bylo totožné jako v předešlém případě. Velikost protékajícího proudu panelem byla nastavena ve více úrovních, abychom mohli zaznamenat chování panelu i při částečném zatížení, které bylo 30 %, respektive 60 %. U tohoto typu panelu bylo nutné při vyšších hodnotách proudu zapojit do série dva laboratorní zdroje. První zdroj měl napěťové omezení do 60 V (U_{OC} panelu je 60 V), což stačilo pouze na protékající proud o velikosti 0,25 A. Připojením druhého zdroje a zvýšením napětí na 63,8 V došlo k úplnému otevření PN přechodu, takže již bylo možné zvyšovat protékající proud panelem na požadovanou hodnotu. Panel byl ponechán v temné místnosti při teplotě 20 – 25 °C.

Počáteční stav článku

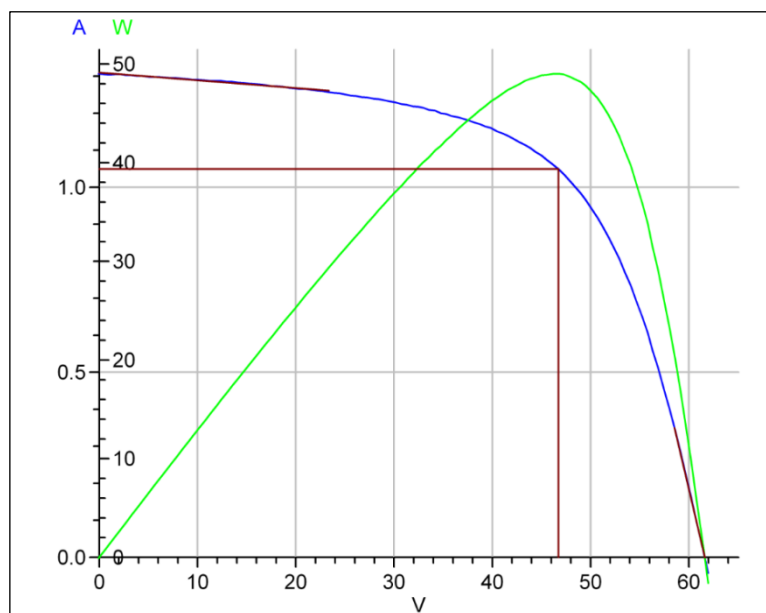
Tab. 8: Elektrické parametry panelu EPV 50

I_{sc}	A	1,305
U_{oc}	V	61,959
Eff	%	5,230
FF	%	60,76
P_{mpp}	W	49,139
U_{mpp}	V	46,143
I_{mpp}	A	1,065
R_{ser}	Ω	8,900
R_{sh}	Ω	497,2

1. Cyklus měření

Velikost konstantního proudu $I = 0,25$ mA

I_{sc}	A	1,310
U_{oc}	V	61,628
Eff	%	5,220
FF	%	60,72
P_{mpp}	W	49,010
U_{mpp}	V	46,729
I_{mpp}	A	1,049
R_{ser}	Ω	8,800
R_{sh}	Ω	479,8

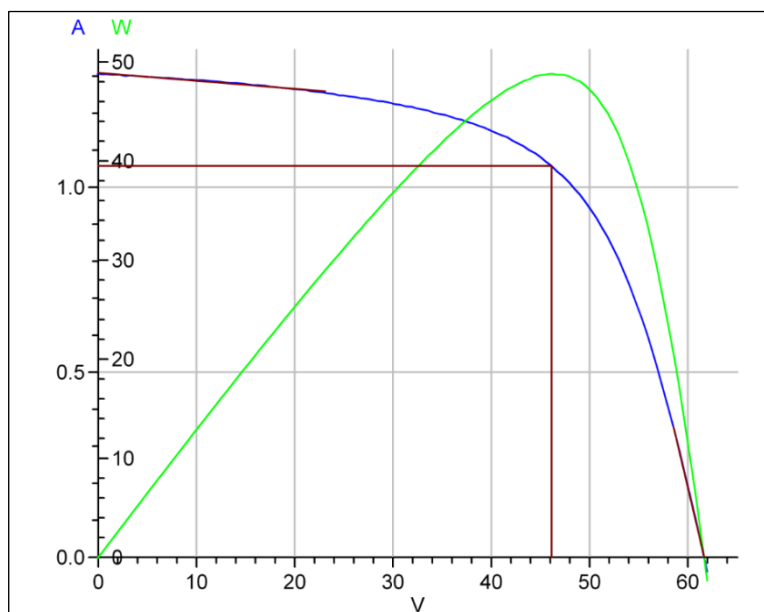


Obr. 44: Elektrické parametry a UI charakteristika panelu EPV-50 po 100 hodinách

2. Cyklus měření

Velikost konstantního proudu $I = 0,52 \text{ mA}$

I_{sc}	A	1,309
U_{oc}	V	61,682
Eff	%	5,200
FF	%	60,42
P_{mpp}	W	48,801
U_{mpp}	V	46,143
I_{mpp}	A	1,058
R_{ser}	Ω	8,900
R_{sh}	Ω	461,5



Obr. 45: Elektrické parametry a UI charakteristika panelu EPV-50 po 260 hodinách

7.6 Žihání

Žihání bylo provedeno v laboratorní tepelné komoře Chirana STE31 (Obr. 46) na panelech, které byly podrobeny Light – soaking a metodě konstantního proudu za temna. Norma ČSN EN 61646 definuje podmínky, jakými je možné vrátit amorfní panely do počátečního stavu. Během žihání dochází k výkonové regeneraci panelu za současného působení teploty a času.



Obr. 46: Laboratorní tepelná komora Chirana STE31

7.6.1 Popis metody

Žihání je možné provést dvěma způsoby:

- a) Působení teploty 150 °C po dobu 60 hodin
- b) Působení teploty 85 °C po dobu 2600 hodin

V obou případech by se měl panel navrátit do tzv. počátečního stavu. V našem případě nebylo možné provést variantu za b) vzhledem k její časové náročnosti (2600 hodin $\approx$ 3,5 měsíce). V kapitole 6.6 je uvedeno, že žihání amorfního článku by se mělo provádět v inertní atmosféře nebo ve vakuu. Jak už bylo řečeno, účelem této práce je realizovat zkušební metody pomocí dostupných zařízení v laboratořích obnovitelných zdrojů. Tepelná komora Chirana STE31, která byla použita pro žihání, pracuje pouze s normální atmosférou (horký vzduch).

Největším problémem však byla ta skutečnost, že amorfní článek byl pokryt vrstvou polymeru, jehož vlastnosti se mohou nevratně změnit při působení vysoké teploty. Běžně používané amorfní panely jsou z pravidla chráněny z obou stran vrstvou skla odolného proti velmi vysokým teplotám, zatímco amorfní vrstva křemíku na našem článku byla nanесena na tenkou vrstvu polymeru neznámých vlastností. Před žiháním celého článku jsme provedli několik testovacích měření.

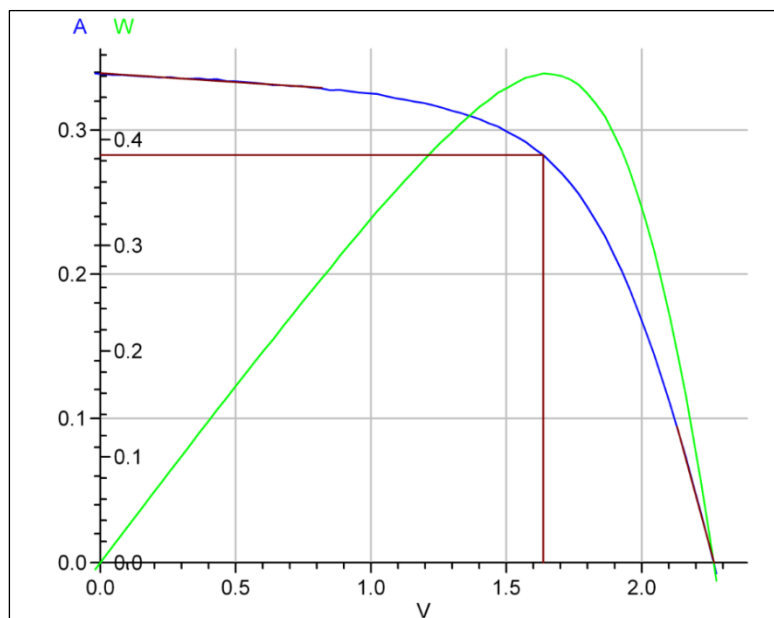
V první řadě byl sledován vliv rostoucí teploty na malém odstřiženém kousku polymeru. Průběžnou kontrolou byla zjištěna teplota, při které dojde k jeho zničení. Při teplotě převyšující 145 °C byly vizuální kontrolou zaznamenány zhoršené optické vlastnosti polymeru a docházelo k „tavení“ materiálu. Testovaná teplota byla nakonec stanovena mezi 130 – 140 °C, abychom se co nejvíce přiblížili teplotě 150 °C definovanou normou. Kvůli velkému teplotnímu rozptylu teplotní komory docházelo během žihání k výkyvům nastavené teploty cca ± 10 °C. Článek byl dle normy ponechán v laboratorní tepelné komoře 60 hodin (Obr. 23).

7.6.2 Naměřená data

Na Obr. 47 a 48 jsou zobrazeny UI charakteristiky a elektrické parametry článků č. II a č. III po jejich žihání.

Amorfní článek č. II (light - soaking test)

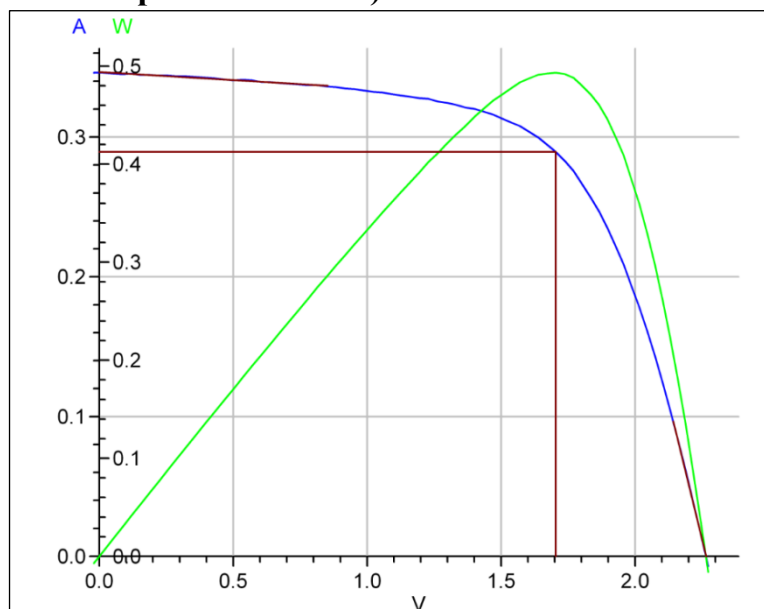
I_{sc}	A	0,339
U_{oc}	V	2,267
Eff	%	3,850
FF	%	60,10
P_{mpp}	W	0,462
U_{mpp}	V	1,637
I_{mpp}	A	0,283
R_{ser}	Ω	1,500
R_{sh}	Ω	80,80



Obr. 47: Elektrické parametry a UI charakteristika panelu č. II po jeho žihání

Amorfní článek č. III (konstantní proud za temna)

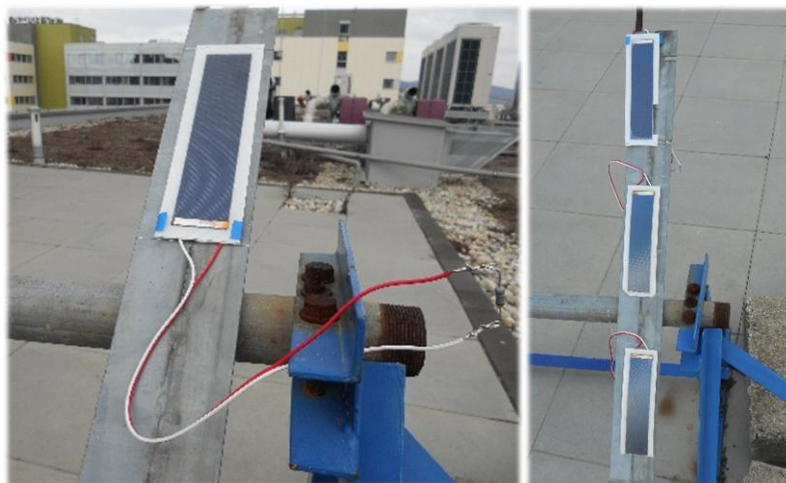
I_{sc}	A	0,347
U_{oc}	V	2,265
Eff	%	4,11
FF	%	62,81
P_{mpp}	W	0,493
U_{mpp}	V	1,704
I_{mpp}	A	0,289
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	86,3



Obr. 48: Elektrické parametry a UI charakteristika panelu č. III po jeho žihání

7.7 Přirozená degradace

Amorfní článek č. I byl s připojenou zátěží umístěn na střeše budovy VUT (Technická 10) na experimentální konstrukci nakloněnou v ideálním úhlu k přímému slunci orientovanou na JV (Obr. 49). Článek byl vystaven přirozenému záření z toho důvodu, abychom získali data a přehled o průběhu degradace nového článku ve venkovních podmínkách. Naměřená data budou sloužit pro srovnání s laboratorními metodami.



Obr. 49: Umístění amorfních FV článku na budově VUT, Technická 10

7.7.1 Naměřená data

V Tab. 6, 10 a 11 je uveden počáteční stav amorfního článku č. I, II a III. Na Obr. 50– 53 jsou zobrazeny UI charakteristiky a elektrické parametry článků po určité době degradace.

a) Článek číslo I

Počáteční stav článku

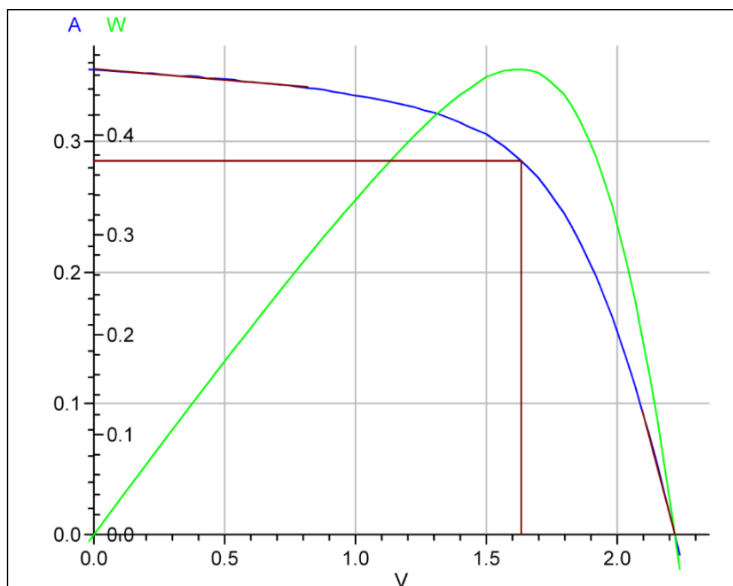
Tab. 9: Elektrické parametry článku číslo I

I_{sc}	A	0,364
U_{oc}	V	2,281
Eff	%	4,360
FF	%	63,05
P_{mpp}	W	0,524
U_{mpp}	V	1,700
I_{mpp}	A	0,308
R_{ser}	Ω	1,200
R_{sh}	Ω	89,10

1. Cyklus měření

Článek byl vystaven přirozenému slunečnímu záření v 11 hod 22. 2. 2014 a znovu sundán v 16 hod 25. 3. 2014. Výsledná doba, po kterou byl článek ve venkovních podmínkách v prvním cyklu, byla 750 hod (cca 31 dní).

I_{sc}	A	0,355
U_{oc}	V	2,221
Eff	%	3,880
FF	%	59,01
P_{mpp}	W	0,466
U_{mpp}	V	1,633
I_{mpp}	A	0,285
R_{ser}	Ω	1,30
R_{sh}	Ω	59,90

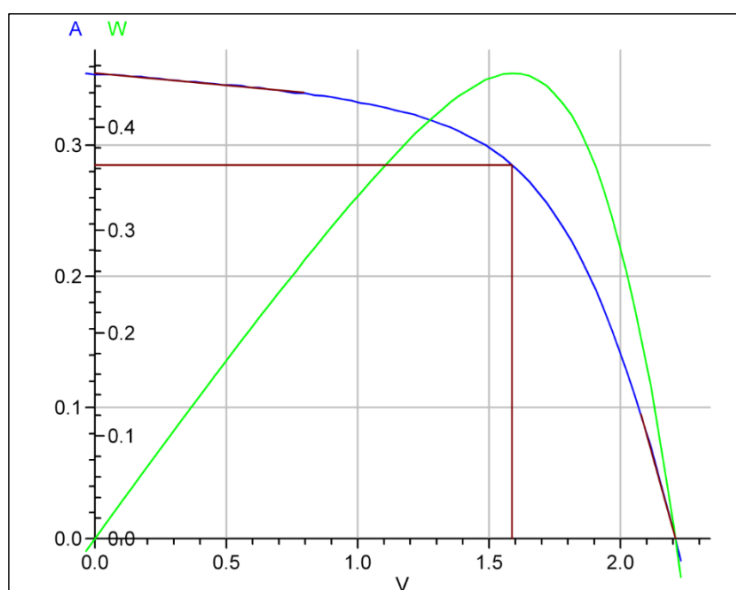


Obr. 50: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. I po 750 hodinách

2. Cyklus měření

Článek byl změřen a nadále ponechán ve venkovních podmínkách od 17 hod dne 27. 3. 2014 do 17 hod dne 6. 5. 2014, což odpovídá dalším 960 hod ve venkovních podmínkách a celková doba je 1710 hod (cca 71 dní).

I_{sc}	A	0,355
U_{oc}	V	2,210
Eff	%	3,770
FF	%	57,68
P_{mpp}	W	0,452
U_{mpp}	V	1,588
I_{mpp}	A	0,285
R_{ser}	Ω	1,400
R_{sh}	Ω	54,20



Obr. 51: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. I po 1710 hodinách

Články č II. a III, které byly podrobeny light – soaking testu, metodě konstantního proudu za temna a následnému žihání, byly také ještě vystaveny přirozeného slunečního záření. Na střechu VUT byly umístěny v 17 hod 16. 4. 2014 a znovu sundány v 17 hod 6. 5. 2014. Výsledná doba, po kterou byly články ve venkovních podmínkách, byla 280 hod (20 dní).

b) Článek číslo II

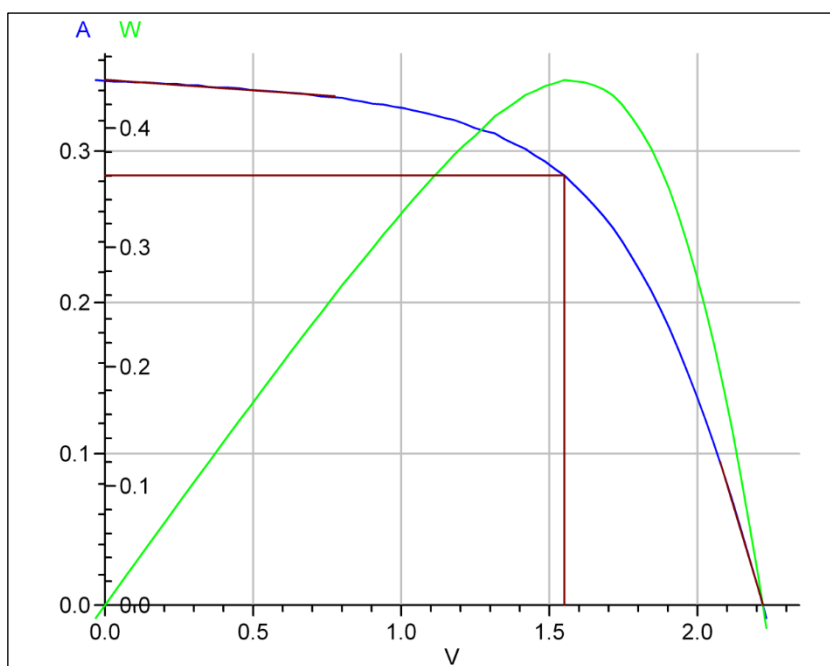
Počáteční stav článku

Tab. 10: Elektrické parametry článku číslo II

I_{sc}	A	0,339
U_{oc}	V	2,267
Eff	%	3,850
FF	%	60,10
P_{mpp}	W	0,462
U_{mpp}	V	1,637
I_{mpp}	A	0,283
R_{ser}	Ω	1,500
R_{sh}	Ω	80,80

1. Cyklus měření

I_{sc}	A	0,347
U_{oc}	V	2,221
Eff	%	3,67
FF	%	57,09
P_{mpp}	W	0,440
U_{mpp}	V	1,551
I_{mpp}	A	0,284
R_{ser}	Ω	1,5
R_{sh}	Ω	71,2



Obr. 52: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. II po 280 hodinách

c) Článek číslo III

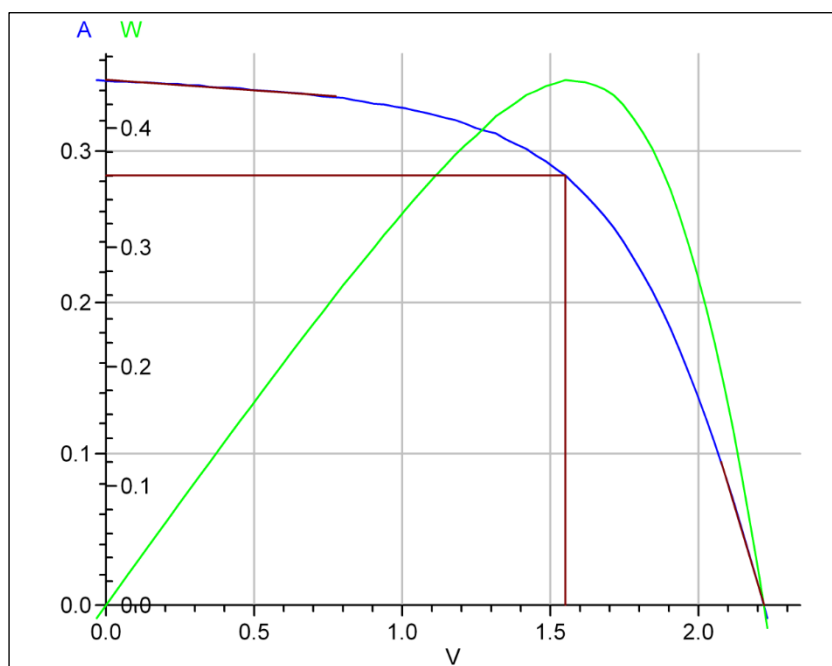
Počáteční stav článku

Tab. 11: Elektrické parametry článku číslo III

I_{sc}	A	0,347
U_{oc}	V	2,265
Eff	%	4,11
FF	%	62,81
P_{mpp}	W	0,493
U_{mpp}	V	1,704
I_{mpp}	A	0,289
R_{ser}	Ω	1,300
R_{sh}	Ω	86,3

1. Cyklus měření

I_{sc}	A	0,350
U_{oc}	V	2,227
Eff	%	3,78
FF	%	58,20
P_{mpp}	W	0,454
U_{mpp}	V	1,556
I_{mpp}	A	0,292
R_{ser}	Ω	1,5
R_{sh}	Ω	72,5



Obr. 53: Elektrické parametry a UI charakteristika článku č. III po 280 hodinách

8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V Tab. 12 je uvedeno srovnání nominální hodnoty výkonu deklarované výrobcem a výkonu změřeného ihned po zakoupení článku. Z tabulky je patrné, že amorfni články mají počáteční hodnotu výkonu vyšší až o desítky % než jejich hodnota nominální. Tímto bylo dle očekávání prokázáno, že testované články neprošly ve výrobě Light – soaking testem a počítá se s jejich výkonovým ustálením až za provozu u koncového uživatele. V případě článku č. II je pravděpodobné, že došlo k částečné výkonové degradaci již před jeho zakoupením (nekvalitní výrobní proces, stáří článku, špatné skladování) vzhledem k hodnotám výkonu u zbylých dvou článků.

Tab. 12: Srovnání tabulkových a změřených hodnot ihned po zakoupení článků

Články SO26 1SC1				
Číslo článku	Aplikace	Nominální hodnota P [W]	Změřené hodnoty P [W]	Rozdíl [%]
1	Venkovní podmínky	0,450	0,524	+16,44
2	Light - soaking test		0,499	+10,89
3	Konstantní proud za temna		0,525	+16,67

Výpočet degradace elektrických parametrů článku je v následujících tabulkách proveden podle vzorce 1.7 (záporné hodnoty reprezentují zvýšení konkrétního hodnoty vůči referenční). Referenční hodnoty představují změřené elektrické parametry článku ihned po jeho zakoupení.

$$\text{degradace po } x \text{ hod} = \frac{\text{Referenční hodnota} - \text{Hodnota po } x \text{ hod}}{\text{Referenční hodnota}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.7)$$

8.1 Light – soaking test

V Tab. 13 jsou uvedeny změřené hodnoty elektrických parametrů článku a jejich degradace v čase.

Tab. 13: Parametry amorfniho článku a jeho degradace vlivem Light - soakingu

Článek č. II								
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	100 h 50°C	200 h 50°C	400 h 50°C	Degradace po 100 h	Degradace po 200 h	Degradace po 400 h
I _{sc}	A	0,362	0,360	0,361	0,358	0,55 %	0,28 %	1,10 %
U _{oc}	V	2,287	2,283	2,281	2,264	0,17 %	0,26 %	1,01 %
Eff	%	4,160	4,090	4,060	4,000	1,68 %	2,40 %	3,85 %
FF	%	60,380	59,730	59,120	59,200	1,08 %	2,09 %	1,95 %
P _{mpp}	W	0,499	0,490	0,487	0,480	1,80 %	2,40 %	3,81 %
U _{mpp}	V	1,666	1,632	1,657	1,665	2,04 %	0,54%	0,06 %
I _{mpp}	A	0,300	0,300	0,294	0,288	0,00 %	2,00 %	4,00 %
R _s	Ω	1,300	1,300	1,400	1,300	0,00 %	-7,69 %	0,00 %
R _p	Ω	87,500	82,300	76,500	74,200	5,94 %	12,57 %	15,20 %

8.2 Konstantní proud za temna

V Tab. 14 a 15 jsou uvedeny změřené hodnoty elektrických parametrů článku a jejich degradace v čase.

Tab. 14: Parametry amorfního článku č. III a jeho degradace vlivem působení proudu 0,4 A

Článek č. III								
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	100 h 40 °C	200 h 40 °C	400 h 40 °C	Degradace po 100 h	Degradace po 200 h	Degradace po 400 h
I_{sc}	A	0,365	0,364	0,362	0,363	0,27 %	0,82 %	0,55 %
U_{oc}	V	2,285	2,263	2,249	2,240	0,96 %	1,58 %	1,97 %
Eff	%	4,370	4,180	4,140	4,100	4,35 %	5,26 %	6,18 %
FF	%	62,94	60,91	61,03	60,59	3,23 %	3,03 %	3,73 %
P_{mpp}	W	0,525	0,502	0,497	0,492	4,38 %	5,33 %	6,29 %
U_{mpp}	V	1,699	1,63	1,64	1,635	4,06 %	3,47 %	3,77 %
I_{mpp}	A	0,309	0,308	0,303	0,301	0,32 %	1,94 %	2,59 %
R_s	Ω	1,200	1,300	1,300	1,300	-8,33 %	-8,33 %	-8,33 %
R_p	Ω	100,1	81,70	80,0	78,60	18,38 %	20,08 %	21,48 %

Tab. 15: Parametry amorfního panelu EPV 50 a jeho degradace vlivem působení proudu 0,25 a 0,52 A

Panel EPV-50						
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	100 h I = 0,25 A	260 h I = 0,52 A	Degradace po 100 h	Degradace po 260 h
I_{sc}	A	1,305	1,310	1,309	-0,38 %	-0,31 %
U_{oc}	V	61,959	61,628	61,682	0,53 %	0,45 %
Eff	%	5,230	5,220	5,200	0,19 %	0,57 %
FF	%	60,76	60,720	60,420	0,07 %	0,56 %
P_{mpp}	W	49,139	49,010	48,801	0,26 %	0,69 %
U_{mpp}	V	46,143	46,729	46,143	-1,27 %	0,00 %
I_{mpp}	A	1,065	1,049	1,058	1,50 %	0,66 %
R_s	Ω	8,900	8,800	8,900	1,12 %	0,00 %
R_p	Ω	497,2	479,800	461,500	3,50 %	7,18 %

Během zkoumání vlivu konstantního proudu za temna na amorfní článek č. III bylo zjištěno, že se jedná o **degradační mechanismus**. Tato nová skutečnost nepotvrdila původní hypotézu, že by se mělo jednat o regenerační proces. Následně bylo nutné aplikovat tuto metodu i na jiný typ amorfního panelu, aby byl potvrzen degradační charakter této metody.

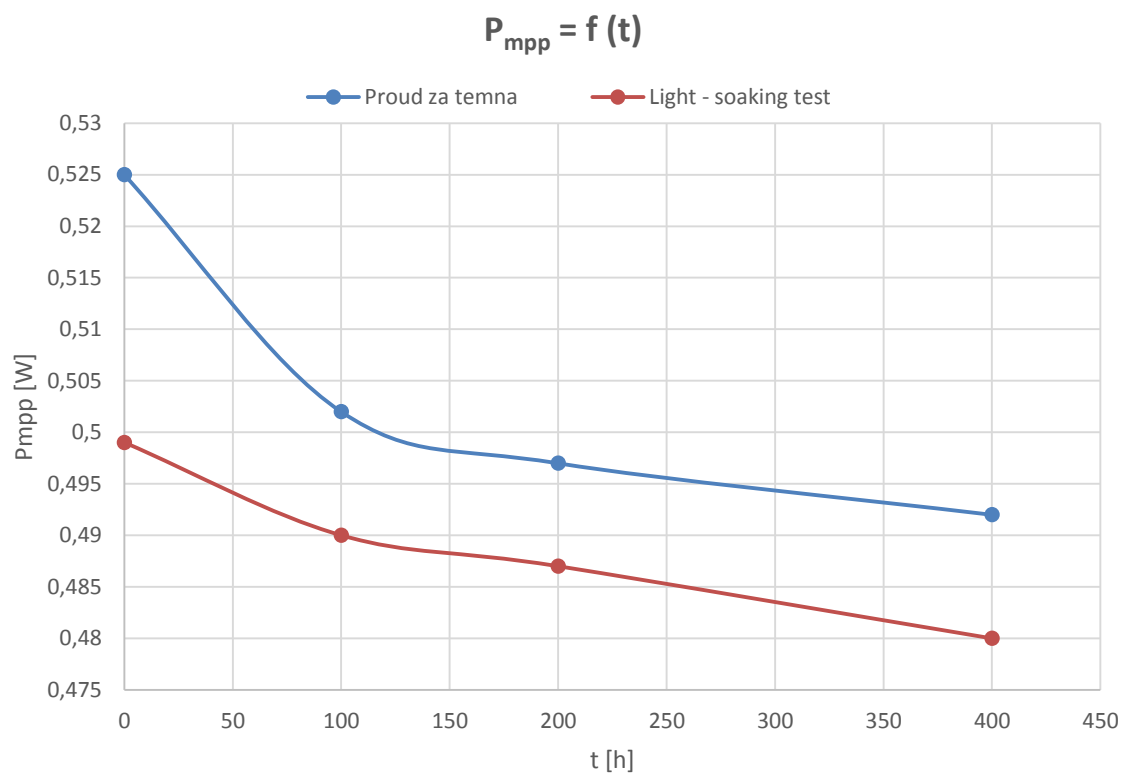
Panel EVP-50 měl zcela jiné elektrické vlastnosti, velikost a hlavně byl již ve svém ustáleném stavu vzhledem k jeho stáří a době používání. I na tomto panelu se potvrdilo, že se jedná o degradační proces. V Tab. 15 je vidět velice pozvolný pokles výkonu pouze o desetiny procent, což bylo očekávané, bereme-li v úvahu, že panel byl zatížen jen částečně a byl již ve svém ustáleném stavu. Lze konstatovat, že ani v jednom případě nedošlo k jakémukoliv růstu hodnoty P_{mpp} .

8.3 Grafické srovnání Light - soakingu a proudu za temna

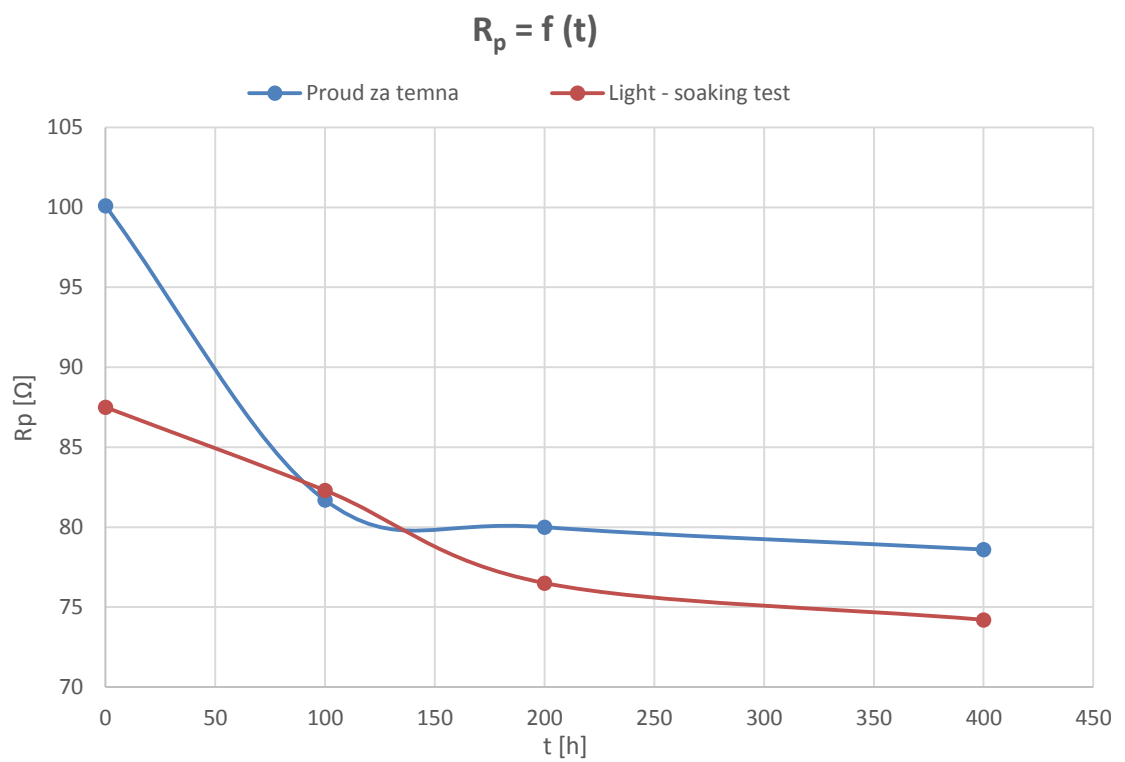
V níže uvedených grafech na Obr. 54 – 59 je uvedeno grafické srovnání základních elektrických parametrů amorfních článků č. II a III. Oba články byly změřeny vždy po stejně dlouhém časovém intervalu, tzn. 100 h, 200 h a 400 h. Parametry jako je Fill Factor nebo efektivita článku zde nejsou uvedeny z toho důvodu, že se jedná o odvozené veličiny ze základních (např. efektivita klesá přímo úměrně se snižujícím se výkonem článku). Dále zde není uvedena grafická závislost sériového odporu (R_s), jelikož se výsledky měnily pouze v rozsahu $\pm 0,1 \Omega$, čímž můžeme považovat hodnotu sériového odporu za konstantní během celého měření. Hodnota byla automaticky zaokrouhlen pouze na dvě platné číslice (graf by měl nulovou výpovědní hodnotu).

Dle předpokladů dochází u článku č. III během prvních 100 – 200 hodin k rapidnějšímu poklesu parametrů než u článku č. II. Tento jev je způsobem tím, že článek č. II vykazoval známky částečné degradace již před jeho zakoupením (viz Tab. 26), takže průběh jeho celkové degradace probíhal pomaleji. Po cca 200 hodinách dochází k částečnému ustálení hodnot a průběh degradace elektrických parametrů má velmi podobný charakter u obou článků. U závislosti I_{SC} došlo k určité anomálii, kdy u obou článků došlo k částečnému zvýšení zkratového proudu v jiném měřeném intervalu. Článek č. II vykazoval zvýšení po 200 hodinách a poté opět klesl. Zatímco článek č. III vykazoval zvýšení po 400 hodinách. Dalo by se očekávat, že při dalším intervalu měření by tato hodnota začala opět klesat. Opět bychom mohli tento průběh připsat tomu, že články neměli stejné počáteční podmínky. Zmíněná anomálie však neměla zásadní vliv na hlavní sledovaný parametr výkon P_{mpp} (Obr. 54).

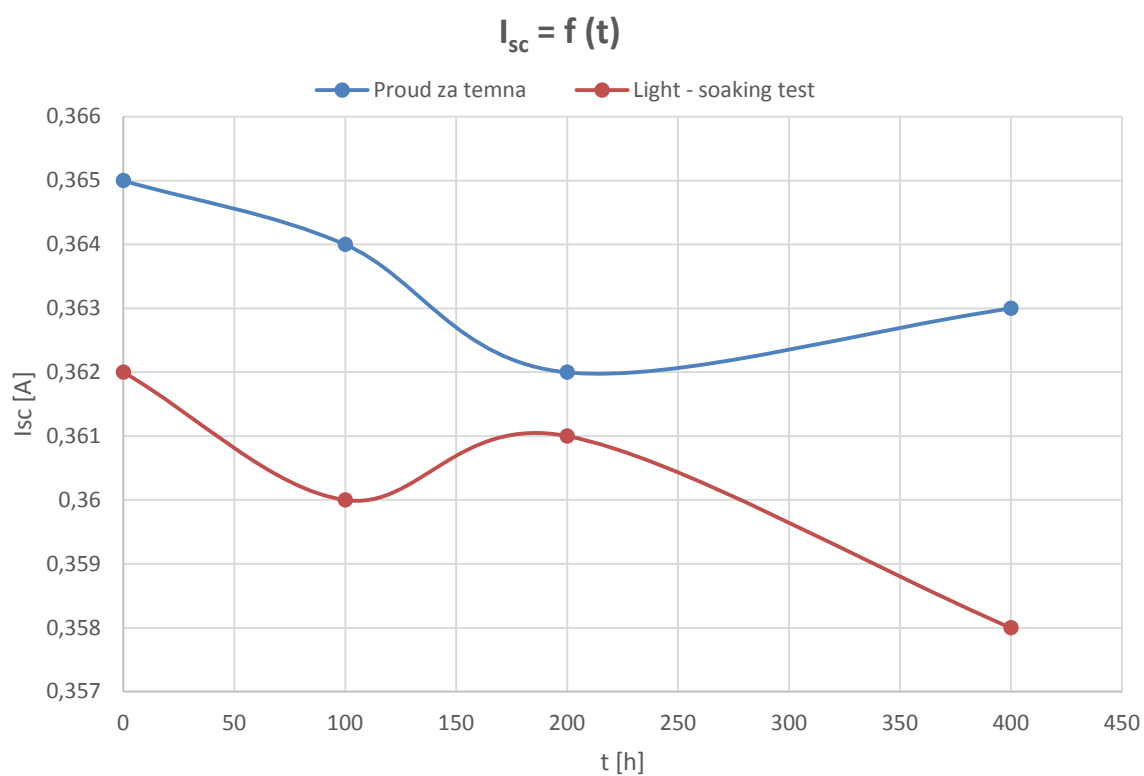
Podle normy ČSN EN 61646 byly provedeny nejméně dva cykly Light- soaking testu a ze získaných dat byla vypočtena degradace výkonu po 200 a 400 hodinách. Vzorec 1.5 v kapitole 6.3 definuje podmínku, kdy můžeme považovat elektrické parametry za ustálené při dodržení určitých parametrů měření. V našem případě byly tyto parametry dodrženy a podmínka splněna. Původní předpokladem však bylo, že degradace vlivem Light – soakingu bude mnohem výraznější. I přes toto zjištění byly články podrobeny žihání (kapitola 8.4). Článek č. III degradovaný konstantním proudem za temna vykazoval podobné změny parametrů a byl podroben žihání po 400 hodinách degradace stejně jako článek č. II.



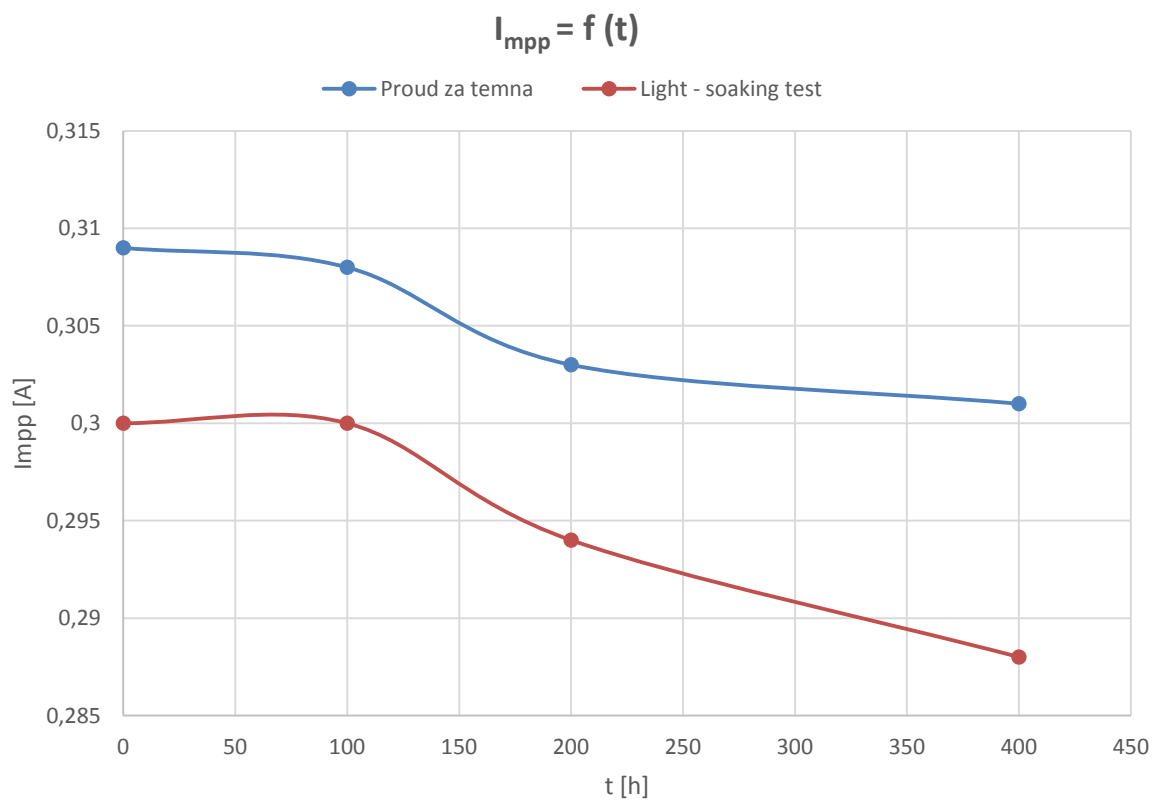
Obr. 54: Grafická závislost výkonu článků P_{mpp} na čase



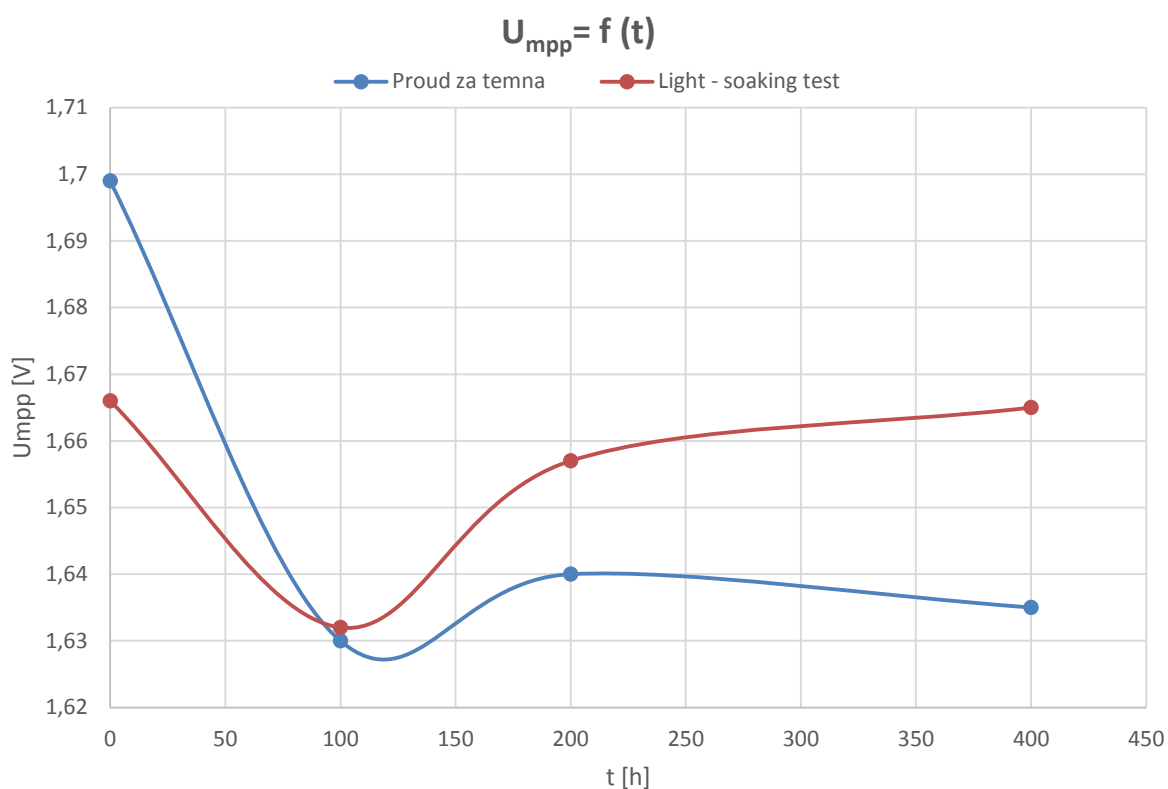
Obr. 55: Grafická závislost paralelního odporu R_p článků na čase



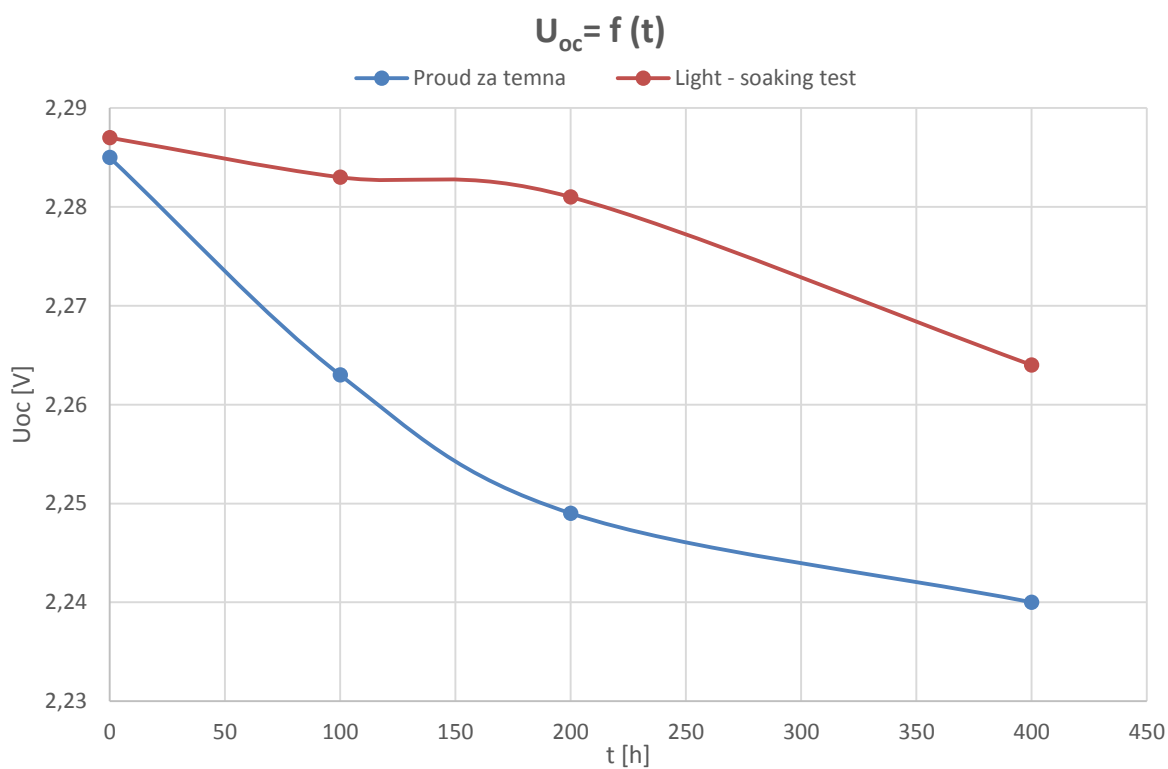
Obr. 56: Grafická závislost zkratového proudu I_{sc} na čase



Obr. 57: Grafická závislost proudu v maximalním bodě výkonu I_{mpp} na čase



Obr. 58: Grafická závislost napětí naprázdno U_{oc} na čase

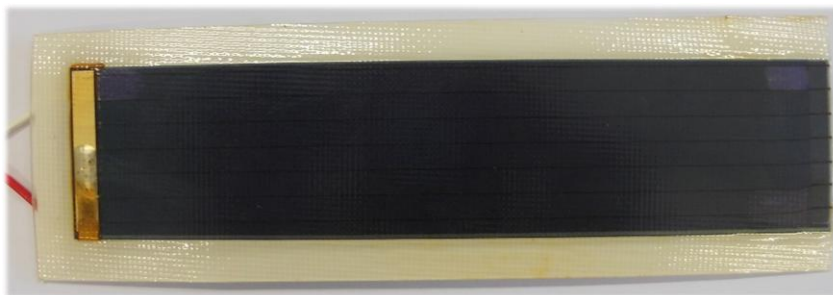


Obr. 59: Grafická závislost napětí v maximálním bodě výkonu U_{mpp} na čase

8.4 Žihání

Z naměřených hodnot v Tab. 16 a 17 je patrné, že žihání článků mělo jiný efekt, než bylo původně předpokládáno. Původním předpokladem dle normy ČSN EN 61646 bylo, že žiháním článků po určitou dobu se vrátí jejich výkon P_{mpp} na počáteční hodnotu. Z výsledků vyplývá, že hodnota hlavního sledovaného parametru P_{mpp} v případě článku č. II klesla o dalších 3,75 % a v případě článku č. III došlo k zvýšení pouze 0,20 %.

Během žihání článků se vyskytl jeden problém, který mohl zásadně ovlivnit elektrické vlastnosti testovaných článků. V kapitole 7.7.1 je popsán problém týkající se působení vysokých teplot na polymer chránící amorfní článek před klimatickými vlivy. Bohužel, i přes snížení teploty na hranici, kdy testovaný odstřížený polymer vykazoval při testování několik hodin stejné optické vlastnosti, došlo vlivem dlouhodobého působení teploty cca 135 °C po dobu 60 hodin k degradaci a celkovému snížení optické propustnosti článku (Obr. 60). Z tohoto důvodu bylo nutné změřit jeho propustnost a porovnat ji s nedegradovaným článkem a přepočítat celkovou degradaci. Princip měření a zhodnocení je popsáno v další kapitole.



Obr. 60: Amorfní článek po žihání

V Tab. 16 a 17 jsou uvedeny hodnoty elektrických parametrů článků před a po žihání. Referenční hodnoty představovaly změřené hodnoty po 400 hodinách působení degračních mechanismů (Light – soaking test, respektive metoda konstantního proudu za temna).

Tab. 16: Elektrické parametry č. II – článek vystaven působení Light – soaking testu

Článek č. II				
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	Hodnota po žihání	Rozdíl
I_{sc}	A	0,358	0,339	5,31 %
U_{oc}	V	2,264	2,267	-0,13 %
Eff	%	4,000	3,850	3,75 %
FF	%	59,20	60,10	-1,52 %
P_{mpp}	W	0,480	0,462	3,75 %
U_{mpp}	V	1,665	1,637	1,68 %
I_{mpp}	A	0,228	0,283	-24,12 %
R_s	Ω	1,300	1,500	-15,38 %
R_p	Ω	74,20	80,80	-8,89 %

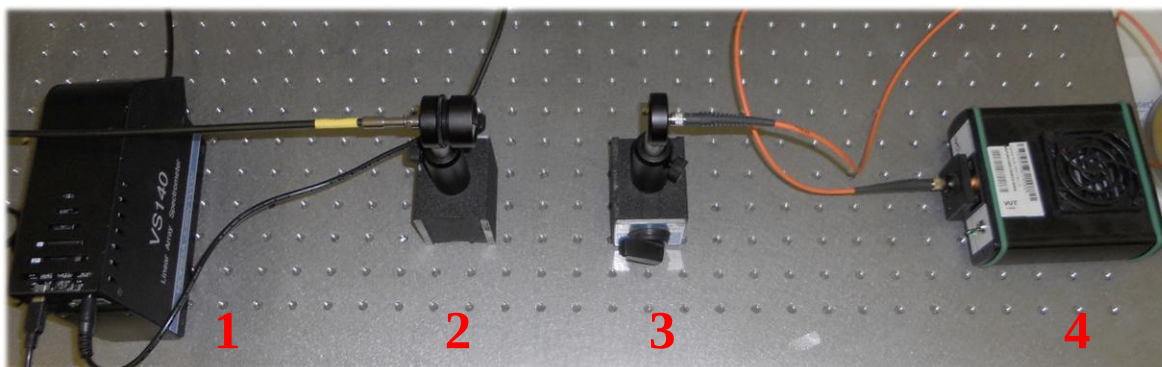
Tab. 17: Elektrické parametry článku č. III – článek vystaven působení konstantního proudu za temna

Článek č. III				
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	Hodnota po žihání	Rozdíl
I_{sc}	A	0,363	0,347	4,41 %
U_{oc}	V	2,240	2,265	-1,12 %
Eff	%	4,100	4,110	-0,24 %
FF	%	60,59	62,81	-3,66 %
P_{mpp}	W	0,492	0,493	-0,20 %
U_{mpp}	V	1,635	1,704	-4,22 %
I_{mpp}	A	0,301	0,289	3,99 %
R_s	Ω	1,300	1,300	0,00 %
R_p	Ω	78,60	86,30	-9,80 %

8.4.1 Spektrometrie

Měření propustnosti bylo provedeno v laboratoři ústavu fyziky pomocí lineárního řádkového spektrometru HORIBA VS140 na speciálně uzpůsobeném stole určeného pro optická měření. Nutnou součástí pro měření propustnosti bylo zajištění zdroje bílého světla s halogenovou žárovkou AvaLight - HAL – S, který má rozsah vyzařovaného spektra 360 – 2000 nm (Obr. 62). Uspořádání pracoviště je zobrazeno na Obr. 61. Celé měření probíhalo v zcela zatemněné laboratoři a navíc byly magnetické stojánky ještě překryty, aby bylo zamezeno ovlivnění měření přirozeným zářením.

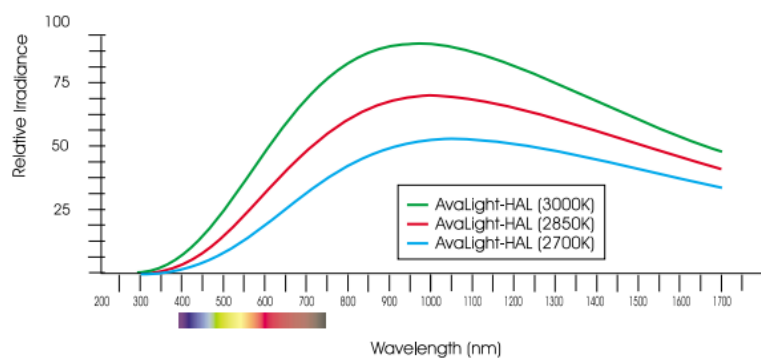
Měření propustnosti bylo založeno na srovnání naměřených výsledků vztažených k určité referenční úrovni. V první řadě byla změřena intenzita záření bez vloženého vzorku, což představovalo referenční úroveň s relativní propustností 100%. Poté byla analogicky změřena intenzita záření celého spektra prostupující nedegradovaným a degradovaným vzorkem. Měřené vzorky polymeru jsou na Obr. 63. Veškerá naměřená data byla exportována do programu EXCEL, kde byl proveden výpočet celkové propustnosti článku před a po žihání.



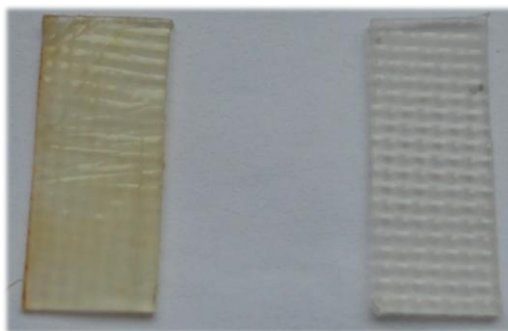
Obr. 61: Uspořádání pracoviště pro měření propustnosti pomocí spektrometru

Legenda Obr. 61:

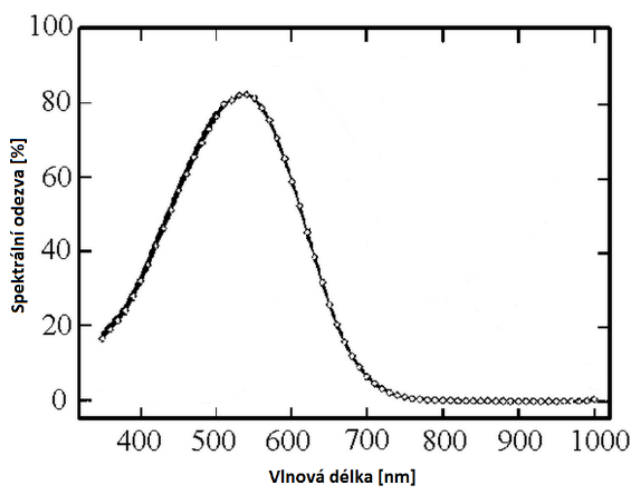
- 1 – spektrometr HORIBA VS140 připojený k PC
- 2 – magnetický stojánek s měřeným vzorkem
- 3 – magnetický stojánek držící optický kabel
- 4 – halogenový zdroj bílého světla AvaLight – HAL – S



Obr. 62: Spektrální charakteristika výstupního paprsku ze zdroje AvaLight –HAL-S [24]



Obr. 63: Degradovaný vzorek (vlevo) a nedegradovaný vzorek polymeru



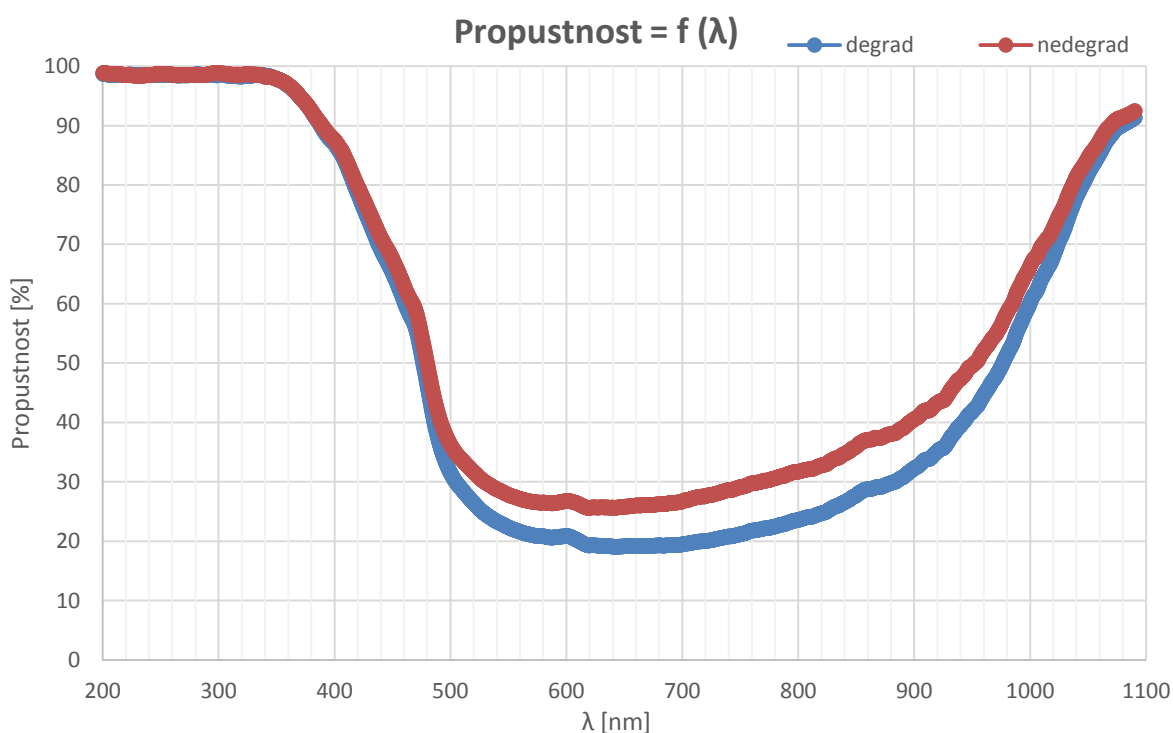
Obr. 64: Teoretická spektrální odezva jednovrstvého amorfního článku a-Si:H [14]

Průměrná hodnota rozdílu propustnosti vzorků v celém měřeném spektru byla 4,6 %. Na Obr. 64 je uvedena teoretická spektrální odezva jednovrstvého amorfního článku pohybující se v rozmezí od 300 do 780 nm. Přepočítaná průměrná hodnota rozdílu propustnosti byla v tomto rozsahu 4,35 %. Výsledná grafická závislost je zobrazena na Obr. 65. Výpočet celkového rozdílu propustnosti byl proveden podle vzorce 1.8, 1.9 a 1.10. Zohledníme-li zhoršení optické propustnosti článku vlivem žíhání, výsledná relativní regenerace obou článků je pouze částečná a elektrické parametry článku po žíhání neodpovídají počátečnímu stavu. Články byly vystaveny příliš vysoké teplotě, které mohli zapříčinit nevratné změny v krycích materiálech článku, takže výsledný průběh regenerace neprobíhal podle předpokladů (viz Obr. 23).

$$\text{propustnost deg.} = \frac{\text{Intenzita deg.}}{\text{Referenční intenzita}} \cdot 100 [\%] \quad (1.8)$$

$$\text{propustnost nedeg.} = \frac{\text{Intenzita nedeg.}}{\text{Referenční intenzita}} \cdot 100 [\%] \quad (1.9)$$

$$\text{rozdl propustnosti} = \text{propustnost degr.} - \text{propustnost nedeg.} [\%] \quad (1.10)$$



Obr. 65: Závislost propustnosti degradovaného a nedegradovaného vzorku na vlnové délce v celém měřeném spektru

8.5 Přirozené záření

V Tab. 18, 20 a 21 jsou uvedeny změřené hodnoty elektrických parametrů článků a jejich degradace v čase.

Tab. 18: Parametry amorfního článku a jeho degradace vlivem přirozeného záření

Článek č. I						
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	375 h 154 h osvitů	1710 h 375 h osvitů	Degradace po 750 h	Degradace po 1710 h
I_{sc}	A	0,364	0,355	0,355	2,47 %	2,47 %
U_{oc}	V	2,281	2,221	2,210	2,63 %	3,11 %
Eff	%	4,360	3,880	3,770	11,01 %	13,53 %
FF	%	63,050	59,010	57,680	6,41 %	8,52 %
P_{mpp}	W	0,524	0,466	0,452	11,07 %	13,74 %
U_{mpp}	V	1,700	1,633	1,588	3,94 %	6,59 %
I_{mpp}	A	0,308	0,285	0,285	7,47 %	7,47 %
R_s	Ω	1,200	1,300	1,400	-8,33 %	-16,67 %
R_p	Ω	89,100	59,900	54,200	32,77 %	39,17%

Tab. 19 uvádí celkový počet osvitových hodin v jednotlivých měsících za rok 2014. Přepočteme-li celkový počet 1710 hod článku umístěného ve venkovních podmínkách na počet osvitových hodin, dostaneme zhruba 375 hodin, kdy byl článek vystaven přímému slunečnímu záření. Respektive v prvním cyklu 750 hod odpovídalo 154 hodinám na přímém slunci. Tyto hodnoty jsou pouze orientační, jelikož vycházíme z průměrných hodnot poskytnutých od ČHMU pro celou oblast Brna. Z Tab. 19 je patrné, že letošní rok byl z hlediska počtu osvitových hodin nadprůměrný v porovnání s dlouhodobým průměrem.

Data z ČHMU jsou dostupná na:

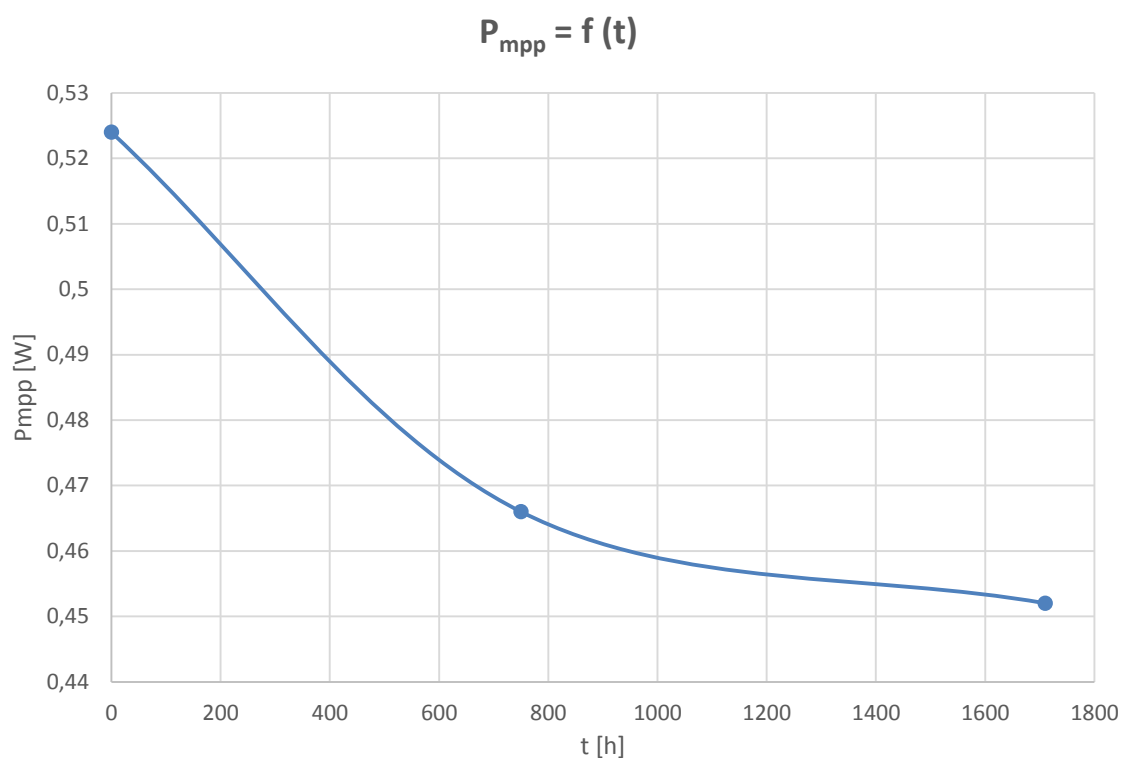
http://portal.chmi.cz/portal/dt?action=content&provider=JSPTabContainer&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_9_Mesicni_data&nc=1&portal_lang=cs#PP_Mesicni_data

Tab. 19: Tabulka letošního a dlouhodobého trvání slunečního svitu pro oblast Brna

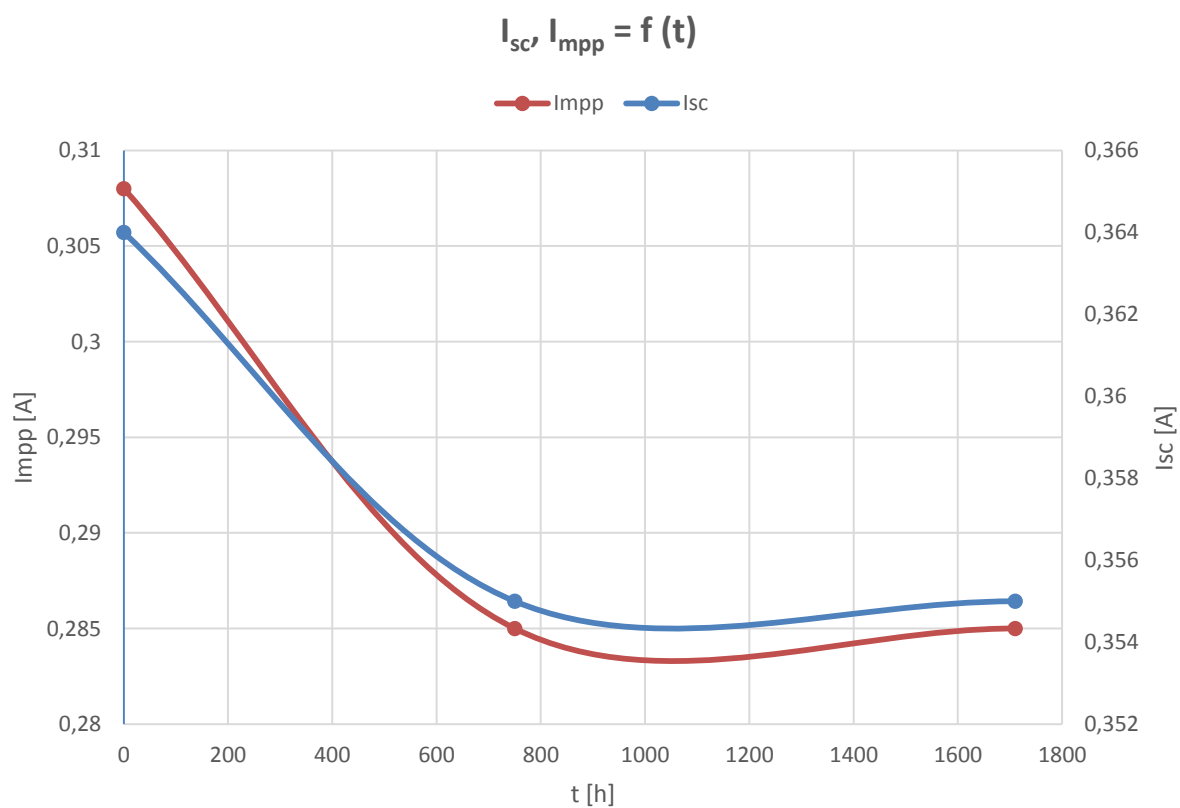
		Únor	Březen	Duben	Celkem
Trvání slunečního svitu za rok 2014	[h]	62,6	174,3	174,8	236,9
Dlouhodobý průměr trvání slunečního svitu	[h]	67,0	127,0	159,0	353,0

8.5.1 Grafy

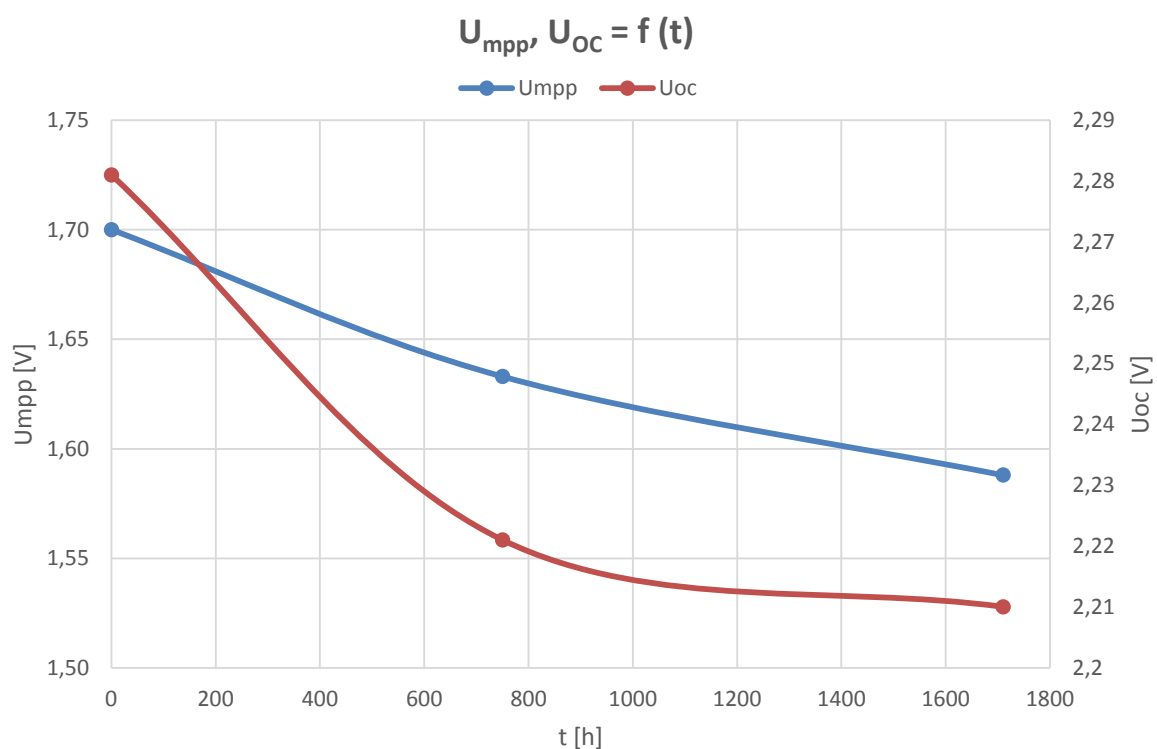
Na Obr. 66 – 67 jsou zobrazeny grafické závislosti základních elektrických parametrů amorfního článku č. I. Ze stejného důvodu jako v předchozím případě zde nejsou uvedeny grafy pro efektivitu (Eff), Fill Factor (FF) a sériový odpor článku (R_s).



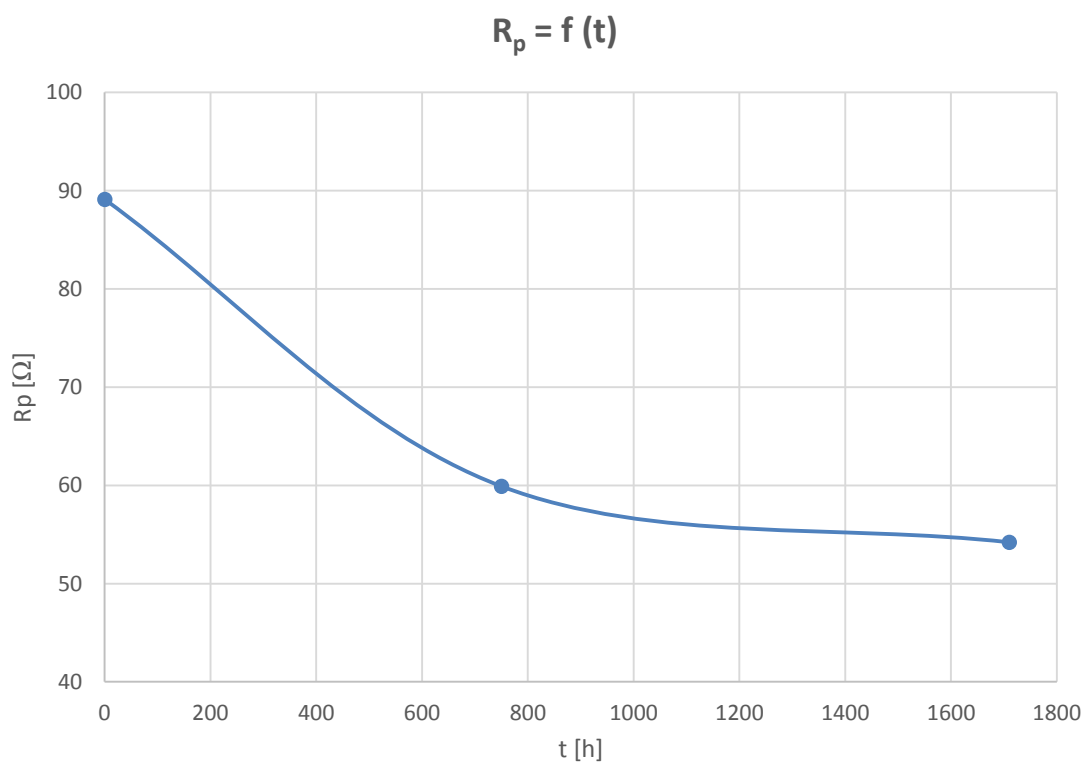
Obr. 66: Grafická závislost proudu v maximalním bodě výkonu I_{mpp} na čase



Obr. 67: Grafická závislost zkratového proudu I_{sc} a proudu v maximalním bodě výkonu I_{mpp} na čase



Obr. 68: Grafická závislost paralelního odporu R_p na čase



Obr. 69: Grafická závislost napětí naprázdno U_{oc} a napětí v maximálním bodě výkonu U_{mpp} na čase

Jelikož jsme v laboratorních podmínkách nedosáhli předpokládaných výsledků během působení 400 hodin light – soaking testu, 400 hodin proudu za temna a 60 hodin žihání, ponechali jsme články č. II a III vlivu přirozeného záření ve venkovních podmínkách po dobu 280 hodin. Podle Tab. 19 tato doba odpovídala po přepočtení cca 108 hodinám na přímém slunci. Sledovali jsme, zda u článků nastane další degradace vlivem přirozeného záření či nikoliv. V Tab. 20 a 21 jsou uvedeny referenční hodnoty elektrických parametrů článků, které v tomto případě neodpovídají počátečním hodnotám změřených ihned po jejich zakoupení, ale odpovídají hodnotám změřených po provedení Light – soaking testu, respektive působení proudu za temna a žihání.

Z naměřených výsledků je zřejmé, že oba již degradované články s nižší propustností světla degradovaly ve venkovních podmínkách mnohem rychleji i přes méně osvitových hodin s nižší intenzitou slunečního záření, než tomu bylo v laboratorních podmínkách. Hodnota výkonu článku č. II, který měl původní hodnotu $P_{mpp} = 0,460$ W, poklesla o dalších 4,76 % na konečných 0,440 W (viz Tab. 20). Tato hodnota je dokonce o 2,22 % nižší než nominální hodnota deklarovaná výrobcem. V případě článku č. III byla výkonová degradace ještě rapidnější. Původní hodnota výkonu 0,493 W poklesla o 7,91 % na hodnotu 0,454 W (viz Tab. 21).

Tab. 20: Parametry amorfního článku a jeho degradace vlivem přirozeného záření

Článek č. II				
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	280 h 108 h osvitu	Degradace po 280 h
I_{sc}	A	0,339	0,347	-2,36%
U_{oc}	V	2,267	2,221	2,03%
Eff	%	3,850	3,670	4,68%
FF	%	60,10	57,09	5,01%
P_{mpp}	W	0,462	0,440	4,76%
U_{mpp}	V	1,637	1,551	5,25%
I_{mpp}	A	0,283	0,284	-0,35%
R_s	Ω	1,500	1,500	0,00%
R_p	Ω	80,80	71,20	11,88%

Tab. 21: Parametry amorfního článku a jeho degradace vlivem přirozeného záření

Článek č. III				
Veličina	Jednotka	Referenční hodnota	280 h 108 h osvitu	Degradace po 280 h
I_{sc}	A	0,347	0,350	-0,86%
U_{oc}	V	2,265	2,227	1,68%
Eff	%	4,110	3,780	8,03%
FF	%	62,81	58,20	7,34%
P_{mpp}	W	0,493	0,454	7,91%
U_{mpp}	V	1,704	1,556	8,69%
I_{mpp}	A	0,289	0,292	-1,04%
R_s	Ω	1,300	1,500	-15,38%
R_p	Ω	86,30	72,50	15,99%

9 ZÁVĚR

V úvodu diplomové práce bylo vysvětleno základní rozdělení FV článků a proveden popis tenkovrstvých článků 3. generace. Byly shrnuty jejich základní vlastnosti, strukturu, modifikace, výhody a nastínil vývojové trendy na poli tenkovrstvých technologií. Hlavní pozornost byla věnována tenkovrstvým FV článkům na bázi amorfního křemíku, u kterých je uveden způsob jejich výroby, výrobní modifikace a vyráběné typy. V další části diplomové práce jsou popsány základní elektrické vlastnosti amorfních článků a také degradační mechanismy ovlivňující jejich UI charakteristiku. Hlavní zaměření je na tzv. Steabler - Wronski efekt, který má největší podíl na výkonové degradaci článku. Dále byla provedena rešerše norem týkajících se testování amorfních článků. V této kapitole byly vysvětleny měřicí procedury, požadavky na měřicí zařízení a podmínky testování. V praktické části diplomové práce byly testovány a srovnány různé postupy, jak uvést amorfní články do testovacích podmínek pomocí zařízení, kterými jsou vybaveny laboratoře obnovitelných zdrojů na VUT.

V experimentální části se provedlo měření na jednovrstvých amorfních článcích stejného typu. V prvním kroku byla změřena UI charakteristika článků, ihned po jejich zakoupení. Výsledky napověděly, že počáteční hodnota výkonu článků byla o 10 – 16 % vyšší než nominální hodnota deklarovaná výrobcem. Dále bylo měřením prokázáno, že jeden z článků byl částečně degradovaný (stáří článku, špatné skladování).

V dalším kroku byly vystaveny tři stejné jednovrstvé amorfní články třem typům mechanismů, které ovlivňují UI charakteristiku článku (Light – soaking test, metoda konstantního proudu za temna a přirozené záření). Účinky Light – soaking testu, stejně jako přirozeného záření, byly podloženy teoretickými poznatky, takže bylo možné předpovědět charakter těchto degradací. Naproti tomu třetí metodou byla tzv. metoda konstantního proudu za temna, u které bylo potřeba zjistit, zda se jedná o regenerační či degradační proces a porovnat její charakter s ostatními metodami. Dva články byly ponechány vlivu Light – soaking testu a metodě konstantního proudu po stejný časový úsek a byly provedeny průběžná měření. Nezávisle na tomto měření degradoval třetí článek ve venkovních podmínkách na střeše VUT, aby bylo nasbíráno více dat o degradaci amorfních článků.

Původním předpokladem bylo, že metoda konstantního proudu za temna bude mít stejný efekt jako žíhání panelu, tzn., že dojde po jeho degradaci (ať už vlivem Light – soaking testu nebo vlivem přirozeného záření) k jeho výkonové regeneraci do počátečních podmínek. Kdyby došlo k potvrzení této úvahy, mohlo by být žíhání panelu nahrazeno metodou konstantního proudu za temna. Poté by byly porovnány u obou metod doby potřebné k navrácení článku do počátečního stavu. Jelikož nebyla tato hypotéza podložena předešlými výsledky, bylo nejprve otestováno působení konstantního proudu za temna na článku, který byl v počátečním stavu ($P_{mpp} > P_{nominální}$). Během prvního měření (po 100 hodinách) se projevila mírná degradace elektrických parametrů a v druhém cyklu měření (po 200 hodinách) došlo k dalšímu poklesu. Článek byl proto ponechán dalších 200 hodin působení proudu a poté byla změřena jeho UI charakteristika. Výsledky prokázaly, že metoda konstantního proudu za temna má **degradační** účinky srovnatelné s Light – soaking testem. Degradační

průběh byl následně ověřen i na jiném typu amorfního panelu, který byl již ve svém ustáleném stavu ($P_{mpp} = P_{nominální}$). I v tomto případě docházelo k mírné degradaci o desetiny %.

Zamýšlený postup práce musel být změněn, jelikož už nebylo možné považovat metodu konstantního proudu za regenerační proces. Během degradace článků v laboratorních podmínkách byl původně očekáván mnohem rapidnější pokles výkonu. I po dvou cyklech Light – soaking testu (2 x 200 hod) byl výkon článku nižší pouze o 3,81 % a v případě proudu za temna byl výkon nižší dokonce o 6,29 % oproti počáteční hodnotě. Vyšší míra degradace působením proudu byla způsobena tím, že článek měl cca o 6 % vyšší počáteční hodnotu výkonu. Z tohoto důvodu docházelo v prvním cyklu k rapidnějšímu poklesu výkonu, zatímco u druhého článku docházelo k pozvolnější degradaci (článek byl z neznámých důvodů částečně degradován již na počátku). V druhém měřeném cyklu došlo ke stabilizaci degradace (první článek degradoval o 0,96 % a druhý o 1,41 % vzhledem k hodnotám z 1. cyklu). Ani u jednoho článku nedošlo k poklesu výkonu na nominální hodnotu $P_{nominální} = 0,450$ W, jak se předpokládalo. Dále se provedlo žihání obou článků současně, jelikož došlo podle normy ČSN EN 61646 k výkonové stabilizaci (byla splněna podmínka uvedená v kapitole 6.3).

Během žihání se vyskytl problém, kdy došlo vlivem vysoké teploty k optické degradaci polymeru chránící amorfni článek. Před samotným žiháním celého článku se provedlo několik testovacích měření na odstřiženém kousku polymeru. Průběžnou kontrolou se zjistila teplota, při které dojde ke zničení polymeru. I přes nastavení nižší teploty došlo vlivem působení vysoké teploty po relativně dlouhou dobu k nevratným změnám v materiálu. Proto bylo provedeno měření optické propustnosti pomocí spektrometru a výsledná nižší průpusnost se zohlednila při výpočtu celkové regenerace. U obou článků došlo pouze k částečné výkonové regeneraci. Tento krok měl navrátit články do původního stavu, ty měly být následně znovu degradovány a poté provedena procedura definovaná dle MITSUBUSHI (Obr. 23).

Nezávisle na probíhajícím měření v laboratorních podmínkách byl ve venkovních podmínkách ponechán jeden amorfni článek po dobu více jak 70 dní. Tato doba odpovídala celkovým 1710 hodinám ve venkovních podmínkách, což podle údajů ČHMU odpovídalo 375 osvitovým hodinám. Během této doby došlo k výkonové degradaci o 13,75 % ($P_{mpp} = 0,452$ W a $P_{nominální} = 0,450$ W). Výsledky potvrdily, že během prvních několika měsíců dochází k výrazné výkonové degradaci vlivem Steabler – Wronskiho efektu. Vlivu přirozeného záření se také ponechaly po dobu 280 hodin (108 osvitových hodin) články, které byly již degradovány z laboratorních podmínek. Během této doby poklesl výkon jednoho článku z 0,462 na 0,440 W (pokles o 4,76 %) a druhého z 0,493 na 0,454 W (pokles o 7,91 %).

Ze všech naměřených výsledků vyplývá, že degradace amorfni článků je vysoce závislá na teplotě. Za výrazně nižších okolních teplot docházelo k rychléjší degradaci, i přestože na článek působilo méně osvitových hodin s nižší intenzitou záření než u Light – soaking testu. Vzhledem k časové náročnosti provedeného měření bych doporučil následující postup pro budoucí měření, které by detailně objasnilo charakter degradační metody konstantního proudu za temna. Použít amorfni článek chráněný sklem (odolnost proti žihání, které by bylo provedeno v interní atmosféře). Během působení proudu ochlazovat článek na nízkou teplotu (v našem případě byla teplota článku 40°C).

SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

A	Amper
AM	Air Mass
a-Si	Amorphous Silicon
a-Si:H	Hydrogen Amorphous Silicon
CdTe	Cadmium Tellur
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide
CIS	Copper Indium Selenide
c-Si	Crystalline Silicon
Eff	Efektivita
EPBT	Energy Payback Time
FF	Fill Factor
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
I_{mpp}	Proud v maximálním bodě výkonu
I_{sc}	Zkratový proud
LCD	Liquid Crystal Display
MHI	Mitsubishi
P_{mpp}	Výkon v maximálním bodě
R_p	Paralelní odpor
R_s	Sériový odpor
STC	Standart Test Conditions
SWE	Steabler - Wronski efekt
TCO	Transparent Conductive Oxid
U_{mpp}	Napětí v maximálním bodě výkonu
U_{oc}	Napětí naprázdno
V	Volt
Ω	Ohm
λ	Vlnová délka
° C	Stupeň Celsia
VA	Volt ampérová

PŘÍLOHY

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

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60904 - 1. *Fotovoltaické součástky: Část 1: Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik*. Červen 2007.
- [2] ČSN EN 60904 - 9. *Fotovoltaické součástky: Část 9: Požadavky na výkon solárního simulátoru*. Červen 2008.
- [3] ČSN EN 61646 ed. 2. *Tenkvrstvé fotovoltaické (FV) moduly pro pozemní použití - Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu*. Únor 2009
- [4] BENDA V., STANĚK K., WOLF P., *Fotovoltaické systémy*. Brno : 15.4.2011. 60 s. Učební texty k semináři. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [5] *Fotovoltaické články – historie a současné trendy vývoje*. ASB. [online]. 11.11.2010 [cit. 2013-12-19]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-a-soucasne-trendy-vyvoje-2262.html>
- [6] *Fotovoltaika pro každého*. Czech RE Agency. [online]. 2003 – 2009 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [7] Gostein M., Dunn L., *Light Soaking Effects on PV Modules: Overview and Literature Review*. [online], 16.3.2011 [cit. 2013-12-19]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011_p25_tf_dunn.pdf
- [8] *Characterization of Photovoltaic Devices by Spectroscopic Ellipsometry Using Equipment From Horiba Scientific*. AZoM. [online]. 11.6.2013 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3744>
- [9] *Intersolar 2011: Nové technologie ve fotovoltaice*. xBizon, s. r. o.. [online]. © 2008 [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/fotovoltaika/intersolar-2011-nove-technologie-ve-fotovoltaice.aspx>
- [10] *Mikromorph Technologie*. VOTUM s.r.o.. [online]. 2009-12 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: <http://www.votum.cz/technologie-mikro/>

- [11] *Physical Characterization*. Kamatlab.com. [online]. © 2012 [cit. 2013-12-19]. Dostupné z: http://www3.nd.edu/~kamatlab/facilities_physchar.html
- [12] *Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R&D*. NREL: Photovoltaics Research. [online]. 6.10.2010 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/pv/thinfilm.html>
- [13] *Pružné fotovoltaické moduly ano či ne?*. TZB-info. [online]. 23.7.2007 [cit. 2013-11-08]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4251-pruzne-fotovoltaicke-moduly-ano-ci-ne>
- [14] *Přeměna sluneční energie v energii elektrickou*. Fyzikální ústav Akademie věd ČR. [online]. © 2008-2010 [cit. 2013-12-19]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>
- [15] *Silicon*. *Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living*. [online]. [2012] [cit. 2013-11-12]. Dostupné z: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_silicon.html
- [16] *Technický popis panelů – Fotovoltaické panely SOLYNDRA – elektrotechnika, průmyslová železniční doprava*. SYSTEMIS czech, s.r.o. [online]. © 2010 [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: <http://www.systemis.cz/www/cz/fotovoltaicke-panely-solyndra/technicky-popis-panelu/>
- [17] *Tenkovrstvé FV technologie*. VOTUM s.r.o.. [online]. 2009-12 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: <http://www.votum.cz/Thin-film/>
- [18] VÁLEK, Jan. *Studium degradace tenkých vrstev*: diplomová práce. Brno : Masarykova univerzita, Fakulta pedagogická, Katedra fyziky, 2009. 84 l., 0 l. příl. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.
- [19] 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.
- [20] *Fotovoltaická laboratoř [CVVOZE]*. *Centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie*. [online]. © 2011 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: [http://www.cvvoze.cz/chemicke_a_fotovoltanicke/lab_fotovoltaicka?s\[\]=pasan](http://www.cvvoze.cz/chemicke_a_fotovoltanicke/lab_fotovoltaicka?s[]=pasan)

- [21] *Lutron SPM-1116SD Environment Meters. Instrumentation Environmental Scientific Industrial – InstrumentCatalog.* [online]. © 2011 – 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.instrumentcatalog.com.au/brands/k-l/lutron/lutron-spm-1116sd>
- [22] *Solární panely – MICRONIX, spol. s r.o.. Micronix.* [online]. © 2009 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.micronix.cz/solarix/zakladni-informace/solarni-panely>
- [23] *Žárovka halogenová lineární BASIC 500W | GM Electronic. GM electronic | elektronika, kterou znáte | GM electronic.* [online]. 1990–2014 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.gme.sk/zarovka-halogenova-linearni-basic-500w-p516-271>
- [24] *AvaLight-HAL Tungsten Halogen Light Source.* [online], [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.wacolab.com/avantes/lightsources3.pdf>