

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Disertační práce



Únor, 2021

Tomáš Finsterle

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

*Diagnostika degradace
fotovoltaických článků a modulů*

Disertační práce

Tomáš Finsterle

Praha, únor, 2021

Doktorský studijní program: (P2612) Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: (2602V009) Elektrotechnologie a materiály

Školitel: prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc.

Školitel specialista: doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.

Bibliografický záznam

FINSTERLE, Tomáš. *Diagnostika degradace fotovoltaických článků a modulů*. Praha, 2021. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Školitel prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc.

Anotace (abstrakt)

Pro diagnostiku fotovoltaických článků a modulů bylo vyvinuto mnoho metod založených na různých principech. Některé z metod je možné aplikovat pouze na technologii využívající krystalický křemík, jiné svou univerzálností umožňují diagnostikovat i fotovoltaické články a moduly založené na bázi tenkých vrstev.

Práce rozebírá problematiku nedestruktivní diagnostiky fotovoltaických článků a modulů. Ačkoliv současné výrobní postupy a technologie jsou na velmi vysoké úrovni, další rozvoj v oblasti fotovoltaiky se nyní jeví limitovaný i v důsledku neschopnosti nalezení možných budoucích defektů již v průběhu výroby. Předmětem výzkumu je tedy nedestruktivní studium poruch článků a modulů, jejich vliv na provoz, životnost a spolehlivost modulů. Za tímto účelem byly použity hlavně již známé metody, ale také metody, které se primárně používaly na diagnostiku jiných součástí, než jsou fotovoltaické moduly, ale jejich použití i pro fotovoltaiku se ukázalo jako velice vhodné. Na základě získaných poznatků a pochopení probíhajících procesů mohou být nalezena doporučení pro výrobce (např. metody mezioperační kontroly), zejména pak pro diagnostiku degračních procesů ve fotovoltaických modulech, pracujících v reálných podmínkách.

Cílem této práce je vytvořit ucelený soubor diagnostických metod, podmínek nutných pro jejich správnou aplikaci a také seznam vad, které jimi lze odhalit a jak je rozpoznat. Značná pozornost byla věnována problematice potenciálem indukované degradace (PID), nalezení optimální metody indikace tohoto degračního procesu a studiu jak průběhu procesu degradace, tak možností procesu regenerace. Výsledky práce mají široké možnosti praktické aplikace.

Klíčová slova

Fotovoltaika; diagnostika; měření volt-ampérových charakteristik; impedanční spektroskopie; termografie; elektroluminiscence, paralelní odpor, PID

Abstract

Many methods based on various principles have been developed for the diagnosis of photovoltaic cells and modules. Some of the methods can be applied only to technology using crystalline silicon, others, due to their versatility, allow the diagnosis of photovoltaic cells and modules based on thin films as well.

The thesis discusses the issue of non-destructive diagnostics of photovoltaic cells and modules. Although current production processes and technologies are at a very high level, further development in the field of photovoltaics now seems limited due to the inability to find possible future defects already during production. The subject of research is therefore a non-destructive study of cell and module failures, their effect on the operation, service life and reliability of modules. For this purpose, mainly known methods, but also methods that were primarily used for diagnostics of components other than photovoltaic modules, but their use for photovoltaics proved to be very suitable were used. Based on the acquired knowledge and understanding of ongoing processes, recommendations can be found for manufacturers (eg methods of inter-operational control), especially for the diagnosis of degradation processes in photovoltaic modules operating in real conditions.

The aim of this work is to create a comprehensive set of diagnostic methods, conditions necessary for their correct application and also a list of defects that can be detected by them and how to recognize them. Considerable attention was paid to the issue of potential-induced degradation (PID), finding the optimal method for indicating this degradation process and studying both the course of the degradation process and the possibilities of the regeneration process. The results of the work have a wide range of practical applications.

Keywords

Photovoltaics; diagnostics; measurement of volt-ampere characteristics; impedance spectroscopy; thermography; electroluminescence, parallel resistance, PID

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou práci zpracoval samostatně a použil jen uvedené prameny a literaturu.

Souhlasím s tím, aby práce byla zpřístupněna pro studijní a výzkumné účely.

V Praze dne 26. 2. 2021

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli prof. Ing. Vítězslavu Bendovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady a dále také všem svým kolegům z katedry i mimo ni, kteří mi po celou dobu studia pomáhali.

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Dosavadní vývoj a teoretická východiska práce	9
2.1	Aktuální stav a vývoj fotovoltaiky a diagnostických metod.....	9
3	Cíle disertační práce	10
4	Fotovoltaický článek - funkce a základní charakteristiky.....	11
4.1	Fyzikální podstata fotovoltaického článku.....	11
4.2	Náhradní model ideálního fotovoltaického článku	15
4.3	Střídavý model fotovoltaického článku	18
4.3.1	Parametry střídavého modelu článku	19
4.3.1.1	Přechodová kapacita	19
4.3.1.2	Difúzní kapacita článku	20
4.3.1.3	Dynamický odpor.....	21
4.4	Parametry fotovoltaického článku	21
4.4.1	Proud nakrátko	22
4.4.2	Napětí naprázdno.....	22
4.4.3	Bod maximálního výkonu	22
4.4.4	Fill factor	22
4.4.5	Účinnost	23
4.4.6	Parazitní odpory	23
4.4.6.1	Sériový odpor.....	23
4.4.6.2	Paralelní odpor	27
4.4.6.3	Omezení použití stanovení parazitních odporů derivací v krajních bodech VACH.....	30
5	Konstrukce a technologie fotovoltaických článků	32
5.1	Dělení fotovoltaických článků	34
5.1.1	Články z krystalického křemíku.....	34
5.1.2	Monokrystalické FV články	34
5.1.2.1	Proces výroby destiček	35
5.1.3	Tenkvrstvé články	41
5.1.3.1	Amorfní křemík	42
6	Fotovoltaické moduly	45
6.1	Moduly z článků z krystalického křemíku	46
6.2	Tenkvrstvé moduly.....	48
7	Popis defektů, jednotlivých poruch a selhání modulů	50
7.1	Definice estetických vad, které nelze považovat za selhání modulu.	50

7.2	Pokles výkonu, který lze považovat za selhání modulu.....	51
7.3	Degradační procesy ve fotovoltaických modulech	51
7.3.1	Degradační procesy působením světla	51
7.3.2	Degenerační procesy působením rozdílu potenciálu.....	54
7.3.2.1	Možnosti regenerace modulů s PID	58
8	Metody pro diagnostiku modulů a článků.....	59
8.1	Vizuální kontrola.....	59
8.1.1	Vizuální kontrola v souladu s normami IEC PV	60
8.2	Měření statických charakteristik - Volt-Ampérové charakteristiky.....	61
8.3	Termografie.....	65
8.3.1	Termografie při provozu	65
8.3.2	Lock-In termografie	67
8.3.3	Pulzní termografie.....	68
8.4	Elektroluminiscence.....	68
8.5	Měření Volt-Ampérových charakteristik neosvětlených článků a modulů.....	69
8.6	Impedanční spektroskopie.....	70
9	Aplikace diagnostických metod	73
9.1	Ověření použitelnosti jednotlivých metod ke studiu degračních procesů vlivem PID 73	
9.1.1	Experiment	73
9.2	Diagnostika procesu PID u fotovoltaického článku a modulu a možnosti následné regenerace	77
9.2.1	Proces degradace	79
9.2.2	Proces regenerace	81
9.2.3	Vyhodnocení použitých metod.....	82
9.2.4	Závěr.....	83
10	Závěr	85
10.1	Možnosti dalšího výzkumu	85
11	Reference.....	86
12	Seznam publikací – s vazbou na disertační práci.....	92
13	Seznam publikací autora – ostatní publikace	95
14	Přílohy.....	96

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Popis	Jednotka
A	plocha	m^2
BSF	Back surface field	
c	Rychlost světla	m/s
C	Kapacita	F
C_D	Difúzní kapacita	F
CdTe	Cadmium-telurid	
C_P	Paralelní kapacita	F
C_T	Bariérová kapacita	F
CVD	Chemical vapour deposition	
d	Šířka ochuzení vrstvy	m
d_b	Tloušťka zadní krycí vrstvy modulu	m
d_f	Tloušťka přední krycí vrstvy modulu	m
D_n, D_p	Difúzní koeficient elektronů a děr	m^2/s
EL	Electroluminescence	
EQE	Externí kvantové účinnosti	
EVA	Ethylene vinyl acetate	
FF	Fill factor	-
FT	Flash test	
FTPS	Fourier-transform-photocurrent-spectroscopy	
FV	Fotovoltaický	
G	Ozářenost	W/m^2
G_M	Měřená ozářenost	W/m^2
G_{NOM}	Požadovaná ozářenost	W/m^2
G_{ref}	Ozářenost 1000 W/m^2	W/m^2
h	Planckova konstanta	Js
h_b	Koeficient přestupu tepla do okolí z zadní strany modulu	$W/m^2 \cdot K$
h_f	Koeficient přestupu tepla do okolí z přední strany modulu	$W/m^2 \cdot K$
I	Proud	A
I_0	Saturační proud PN přechodu	A
I_{01}	Difúzní složka proudu PN přechodem	A
I_{02}	Generačně rekombinační složka proudu PN přechodem	A
I_{COR}	Korigovaný proud	A
I_D	Proud tekoucí PN přechodem	A

I_{MP}	Proud v bodě maximálního výkonu	A
I_{PV}	Fotovoltaický proud	A
I_{RP}	Proud paralelním odporem	A
IS	Impedanční spektroskopie	
I_{SC}	Zkratový proud fotovoltaického článku/modulu	A
J_{FV}	Hustota fotovoltaického proudu	A/m ²
J_{FVN}	Hustota fotovoltaického proudu v oblasti N	A/m ²
J_{FVP}	Hustota fotovoltaického proudu v oblasti P	A/m ²
J_{OPN}	Hustota proudu v oblasti prostorového náboje	A/m ²
k	Boltzmannova konstanta	J/K
K_{TI}	Teplotní koeficient proudu	A/°C
LID	Light induced degradation	
L_n, L_p	Difúzní délka elektronů a děr	m
LS	Light soaking	
m	Počet článků spojených do série	-
MPP	Bod maximálního výkonu	
N_A	Koncentrace akceptorů	m ⁻³
N_D	Koncentrace donorů	m ⁻³
n_i	Intrinzická koncentrace	m ⁻³
n_{NO}	Rovnovážná koncentrace elektronů v oblasti typu N	m ⁻³
Δn	Přírůstek koncentrace volných nosičů náboje	m ⁻³
OPN	Oblast prostorového náboje	
PDS	Photothermal deflection spectroscopy	
PERC	Passivated emitter rear contact	
PERT	Passivated emitter rear totally diffused	
PID	Potential induced degradation	
P_{IN}	Příkon	W
P_{MAX}	Maximální výkon fotovoltaického článku/modulu	W
p_{PO}	Rovnovážná koncentrace děr v oblasti typu P	m ⁻³
p_{th}	Hustota generovaného tepelného výkonu	W/m ²
PVB	Poly vinyl butyral	
q	Elementární náboj elektronu	C
Q	Náboj	C
\mathfrak{R}	Odrazivost povrchu	
R_D	Odpor diody	Ω
R_d	Dynamický odpor	Ω
R_i	Jednotlivé složky sériového odporu	Ω
R_P	Paralelní odpor fotovoltaického článku/modulu	Ω

R_P^*	Odhad paralelního odporu fotovoltaického článku/modulu získaný ze směrnice tečny v krajních bodech V-A charakteristiky	Ω
R_S	Sériový odpor fotovoltaického článku/modulu	Ω
R_S^*	Odhad sériového odporu fotovoltaického článku/modulu získaný ze směrnice tečny v krajních bodech V-A charakteristiky	Ω
r_{thca}	Tepelný odpor mezi článkem a okolím vztažený na jednotku plochy	W/m^2K
S_R	Povrchová rekombinace	$m^{-3}s^{-1}$
STC	Standardní testovací podmínky	
T	Termodynamická teplota	K
T_a	Okolní teplota	$^{\circ}C$
T_c	Teplota článku uvnitř modulu	$^{\circ}C$
TCO	Transparent conductive oxide – transparentní vodivý oxid	
TF	Thin-film	
T_{fs}	Teplota předního povrchu	$^{\circ}C$
T_M	Měřená teplota	$^{\circ}C$
T_{NOM}	Nominální teplota z STC	$^{\circ}C$
TOPCon	Tunnel oxide passivated contact	
U	Napětí	V
U_{Dif}	Difúzní napětí	V
U_j	Napětí na PN přechodu	V
u_m	Amplituda střídavé složky přiloženého napětí	V
U_{MP}	Napětí v bodě maximálního výkonu	V
U_{OC}	Napětí otevřeného obvodu	V
W	Energie	eV
$W_{F(N)}$	Fermiho hladina v polovodiči typu N v termodynamické rovnováze	eV
$W_{F(P)}$	Fermiho hladina v polovodiči typu P v termodynamické rovnováze	eV
W_g	Energie zakázaného pásu	eV
W_g	Energie zakázaného pásu	eV
W_i	Fermiho hladina v intrinzickém polovodiči	eV
x_n, x_p	Šířka ochuzené vrstvy v oblasti typu N a P	m
$Z(\omega)$	Frekvenčně závislá impedance	Ω
α	Absorpční koeficient	m^{-1}
β	Počet nosičů generovaných zářením dané vlnové délky	
ϵ_0	Permitivita vakua	F/m
ϵ_r	Relativní permitivita	F/m
η	Účinnost	%

κ_b	Tepelná vodivost zadní krycí vrstvy	W/mK
κ_f	Tepelná vodivost přední krycí vrstvy	W/mK
λ	Vlnová délka	m
μ_n, μ_p	Pohyblivost elektronů, děr	$\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
ξ	Diodový faktor	
ρ_0	Rezistivita neozářeného polovodičového materiálu	Ωm
ρ_m	Rezistivita ozářeného polovodičového materiálu	Ωm
τ	Doba života nerovnovážných nosičů náboje,	s
τ_{au}	Doba života nerovnovážných nosičů při Augerově rekombinaci	s
τ_{rad}	Doba života nerovnovážných nosičů při zářivé rekombinaci	s
τ_{sc}	Doba života volných nosičů náboje	s
τ_t	Doba života nerovnovážných nosičů při rekombinaci na lokálních centrech	s
Φ_0	Tok fotonů vstupujících do materiálu	s^{-1}
Φ_{bb}	Intenzita vyzařování černého tělesa	W/m^2
Φ_{in}	Fotonový tok dopadajícího světla	s^{-1}
Ψ	Konstanta úměrnosti mezi Δn a G	$\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$

Seznam obrázků

Obr. 1 Šířka OPN	13
Obr. 2 Difúzní napětí – pásový diagram	15
Obr. 3 Náhradní schéma ideálního fotovoltaického článku.	15
Obr. 4 Náhradní schéma ideálního článku s přidáním sériovým odporem.	16
Obr. 5 Náhradní schéma reálného článku, jednodiodový.	17
Obr. 6 Náhradní schéma reálného článku, dvou diodový.	17
Obr. 7 Náhradní schéma PV článku - převzato z [9]	18
Obr. 8 Zjednodušené náhradní schéma - převzato z [9].....	19
Obr. 9 Volt ampérová charakteristika článku.....	22
Obr. 10 Znázornění sériového odporu, převzato z [16].	26
Obr. 11 Vliv ozáření na odhad R_s^* pomocí směrnice tečny v blízkosti U_{oc}	27
Obr. 12 Vliv paralelního odporu na VA charakteristiku a ovlivnění směrnice v U_{oc}	30
Obr. 13 Teoretická maximální účinnost článků různých materiálů [3].....	32
Obr. 14 Rozdělení ztrát ve fotovoltaickém článku.....	33
Obr. 15 Struktura FV článků z přímého polovodiče	34
(tenkovrstvý) a nepřímý polovodič (na bázi destiček). - převzato z [23].....	34
Obr. 16 Princip řezání křemíkového ingotu.	35
Obr. 17 BSF struktura	36
Obr. 18 Povrchová struktura. (A) Alkalické anizotropické leptání (1; 0; 0) orientované monokrystalické destičky Si.(B) Kyselé anizotropické leptání multikrystalické křemíkové destičky [4].....	37
Obr. 19 Způsob kontaktování článků	38
Obr. 20 Proces výroby BFS [26].....	39
Obr. 21 PERC struktura	39
Obr. 22 PERT struktura.....	40
Obr. 23 TOPCon struktura	41
Obr. 24 Struktura solárního článku z amorfního křemíku	43
Obr. 25 a) Náhradní schéma sériově spojených článků v modulu, b) Zjednodušené náhradní schéma sériové spojení m článků	45
Obr. 26 Pájené spojení jednotlivých článků.....	46
Obr. 27 Výsledná matrice článků.	46
Obr. 28: Postup výroby TF modulu	48
Obr. 29 Estetické defekty, které nemají vliv na výkon modulu.....	51
Obr. 30 Průběh dlouhodobé degenerace článku ovlivněný sezónním kolísáním.....	52
Obr. 31 Polarizace sodnými ionty	56
Obr. 32 Polarizace sodnými ionty a vznik zkratu	57
Obr. 33 Elektrochemická koroze TCO.....	57
Obr. 34 Průběh intenzity záření během flash testeru (zelená linka).....	62
Obr. 35 Deformace volt ampérová charakteristiky způsobených defekty	64
Obr. 36 Schéma zapojení elektroluminiscenčního měření.....	69
Obr. 37 Schéma zapojení měření neosvětlených článků.....	69
Obr. 38 Cole-Cole diagram FV	71
Obr. 39 Cole-Cole diagram FV modulu složeného ze 4 článků a změny diagramu v závislosti na předpětí	72
Obr. 40 Elektroluminiscence multikrystalických článků	74
Obr. 41 Elektroluminiscence monokrystalických článků	74
Obr. 42 Cole-Cole diagram monokrystalického modulu	75

Obr. 43 Cole-Cole diagram multikrystalického modulu	75
Obr. 44 Elektroluminiscence tenkovrstvého modulu	76
Obr. 45 Cole-Cole diagram TF modulů	76
Obr. 46 Modifikace testovaného modulu	78
Obr. 47 Elektroluminiscenční snímky v průběhu degradace	79
Obr. 48 a): V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV modul.....	80
Obr. 49 a): V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV článek	80
Obr. 48 b): Cole-Cole diagram během degradace pro FV modul	80
Obr. 49 b): Cole-Cole diagram během degradace pro FV článek	80
Obr. 48 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV modul.....	80
Obr. 49 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV článek.....	80
Obr. 50 a): V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV modul.....	81
Obr. 51 a): V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV článek	81
Obr. 50 b): Cole-Cole diagram během regenerace pro FV modul	81
Obr. 51 b): Cole-Cole diagram během regenerace pro FV článek.....	81
Obr. 50 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV modul.....	82
Obr. 51 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV článek	82
Obr. 52 Změna výkonu modulu v průběhu degradace	82
Obr. 53 Změna R_p v průběhu degradace	82
Obr. 54 Vývoj parametrů FV modulu během degradace a následné regenerace	83
Obr. 55 Vložený nenakontaktovaný fragment	96
Obr. 56 Delaminace, jako majoritní vada.....	96
Obr. 57 Ztráta mechanické integrity.....	96
Obr. 58 Zahoření zadní krycí fólie	96
Obr. 59 Tepelné poškození článku	96
Obr. 60 Delaminace multikrystalického modulu	97
Obr. 61 Delaminace monokrystalického modulu.....	97
Obr. 62 Elektrochemická koroze a delaminace TF modulu.....	97
Obr. 63 Ztráta mechanické integrity u TF modulu.....	97
Obr. 64 Změna transparentnosti pouzdrícího materiálu	97
Obr. 65 Šnečí cestičky.....	98
Obr. 66 Delaminace krycí fólie.	98
Obr. 67 Migrace cínu způsobená vlhkostí.....	99
Obr. 68 Elektrochemická koroze způsobená vlhkostí	99
Obr. 69 Praskliny zadní krycí fólie	100
Obr. 70 Praskliny zadní krycí fólie	100
Obr. 71 Postupně degradující zadní krycí fólie.....	101
Obr. 72 Praskliny zadní krycí fólie	101
Obr. 73 Netěsnosti mezi rámem a hranou skla modulu	102

1 Úvod

Pro ekonomicky udržitelný a bezpečný provoz fotovoltaických (FV) systémů je nezbytné včas rozpoznat možné poruchy. Nejproblematictějším prvkem z hlediska diagnostiky je pak zejména fotovoltaický modul. Pro diagnostiku fotovoltaických článků a modulů bylo vyvinuto mnoho metod založených na různých principech, z nichž některé je možné použít pouze na moduly vyrobené z krystalického křemíku, který ve fotovoltaických aplikacích dominuje.

Samotná aplikace určité diagnostické metody na zkoumaný objekt však nestačí k přesnému popsání vady nebo defektu a už vůbec ne k prognóze vývoje vady, která bývá u fotovoltaických systémů někdy více důležitá, než samotná skutečnost přítomnosti vady nebo poškození. Vyhodnocování některých diagnostických metod je založeno spíše na empirických znalostech a zkušenostech, než na jasně definované hodnotě určitého parametru. Přesto však i tyto metody jsou nepostradatelnou součástí komplexní diagnostiky a mnoho z nich nachází uplatnění v diagnostice celých fotovoltaických systémů (FVS) přímo v místě instalace. Dnešní statistiky ukazují, že rychlost degradace jmenovitého výkonu pro krystalické křemíkové FV moduly vlivem stárnutí materiálů nepřekročí v drtivé většině instalací 0,8 % / rok [1]. Prodloužení životnosti fotovoltaických modulů přispívá ke snížení ceny vyráběné energie. Jedinou možností jak zvýšit spolehlivost a životnost FVS je pochopení problémů, které zapříčiňují právě pokles spolehlivosti a životnosti.

V současné době existuje mnoho metod umožňujících charakterizaci funkce a predikci selhání selhání FV modulu, a to jak přímo v terénu, tak i v laboratořích. Jedná se například o diagnostiku pomocí volt-ampérových charakteristik. Důležité poznatky může přinést i vizuální kontrola.

V první části této práce jsou popsány některé metody měření, které umožňují identifikaci a analýzu poruch FV článků a modulů. Každá metoda je popsána a vysvětlena, včetně podmínek, které je potřeba dodržet při její aplikaci. Dále je uvedeno, jak interpretovat výsledky, a to včetně zobrazovacích metod jako je např. termografie a elektroluminiscence, která se stala velice populární, a to zejména z důvodu snadného odhalování mechanického poškození jednotlivých článků FV modulu.

V další části jsou podrobně popsány nejčastější poruchy FV modulů. Zejména se jedná o následující poruchy: delaminace, ztráta přilnavosti zadní krycí vrstvy, selhání junction boxu, zbarvení transparentní vrstvy EVA (Ethyl Vinyl Acetate), snail trails, potenciálem indukovaná degradace (PID), ztráta vodivého spojení jednotlivých článků, vadné by-pass diody; degradace samotného absorbéru (tenké vrstvy). Dále je u jednotlivých poruch, u kterých je to možné,

uveden a vysvětlen důvod vzniku. Značná pozornost je zaměřena na problematiku PID, kde přes značné úspěchy výrobců při optimalizaci technologie výroby, zůstává možnost zrychleného stárnutí u fotovoltaických systémů pracujících v náročných podmínkách. Vývoj metod včasné detekce počínající degenerace je jedním z výsledků předložené disertační práce.

2 Dosavadní vývoj a teoretická východiska práce

V následující kapitole je stručně shrnut základní vývoj fotovoltaiky a dále standardní diagnostické metody a přístup k charakterizaci defektů článků a modulů.

2.1 Aktuální stav a vývoj fotovoltaiky a diagnostických metod.

V průběhu více než padesátiletého vývoje byly vyvinuty fotovoltaické články a moduly z různých druhů materiálů. V současné době jsou ve velkých sériích vyráběny fotovoltaické články a moduly primárně z krystalického křemíku, tento trend však nebyl od začátku rozvoje fotovoltaiky, a to zejména kvůli vysoké výrobní ceně krystalických článků. Rozvoj výzkumu tenkovrstvých technologií gradoval okolo roku 1990 a v roce 1992 představoval amorfni křemík téměř 30 % celkové produkce. Hlavním problémem amorfniho křemíku je však rychlá degradace. Nicméně, v této době byly krystalické technologie stále ještě finančně nákladné, a snaha rozšířit fotovoltaiku jako běžný zdroj energie spustila po roce 2005 druhou vlnu nárůstu produkce tenkovrstvých technologií. V roce 2010 představovaly tenkovrstvé technologie 15 % celkové produkce a předpokládalo se dosažení zhruba 50 % produkce okolo roku 2020. Technologický pokrok v oblasti krystalického křemíku vedl ale k výraznému snížení ceny, zvýšení účinnosti i zvýšení životnosti modulů z krystalického křemíku, takže podíl tenkovrstvých technologií se od roku 2011 snižuje a v roce 2019 klesl na 3 % celkového objemu produkce. Poměrně rapidně se však změnilo procentní zastoupení monokrystalického křemíku, a to ze 45 % v roce 2018 na přibližně 66 % v roce 2019 [2]. S klesající cenou fotovoltaických modulů je zřejmé, že bude více a více využívána dražší forma základního materiálu, tato změna spolu s vyladěním výrobních postupů umožnila navýšení účinnosti křemíkových článků až na 26 %. Další výrazný nárůst účinnosti křemíkových článků, tak jak je známe dnes, již není možné předpokládat a vývoj se bude muset znovu více soustředit jednak na zvyšování životnosti, dále pak na alternativní materiály. Nicméně výroba velkých sérií tenkovrstvých modulů z materiálů jako je např. CdTe nebo GIGS je omezena nedostatkem výchozích materiálů. Ze současných materiálů by tak krystalickému křemíku mohl konkurovat perovskit, tento materiál však zatím nedosahuje dostatečné stability a ani životnosti.

Životnost modulů je velmi důležitým parametrem ovlivňujícím cenu vyráběné elektřiny. Z tohoto důvodu jsou metody umožňující rozpoznat počínající degradaci parametrů a nalezení příčin degradace důležité pro úpravy konstrukce, technologie a provozních podmínek tak, aby se dosáhlo lepších technicko-ekonomických parametrů výroby elektřiny pomocí fotovoltaických systémů.

3 Cíle disertační práce

Smyslem studia bylo řešení problémů v oblasti nedestruktivní diagnostiky fotovoltaických článků a modulů. Samostatným významným cílem je vytvoření souboru poznatků v oblasti výzkumu zabývajícího se fyzikální podstatou defektů a jejich charakterizace. Základním cílem disertační práce je aplikace vybraných diagnostických metod ke studiu důležitých degradačních procesů ve fotovoltaických modulech s cílem predikce degradačních procesů a minimalizace poruch ve fotovoltaických systémech (fotovoltaických elektrárnách). Možnosti nedestruktivní diagnostiky FV článků v laboratoři jsou poměrně rozsáhlé, problém však nastává, pokud chceme odhalit defekt modulu v raném stádiu, přímo v terénu, bez nutnosti demontáže a transportu modulu. Z tohoto důvodu je cílem práce i rozšíření možností nedestruktivních diagnostických metod, které sice byly využívány pro diagnostiku součástek, ale nebyly aplikovány na FV modul, kde velká plocha přechodu, silně nesymetrický PN přechod a parazitní odpory způsobují velmi nekonvenční chování.

Experimentální činnost je možno rozdělit do dvou období. Na počátku doktorského studia byla zaměřena do oblasti diagnostiky tenkovrstvých modulů v souladu s předpokládaným trendem rozšíření produkce FV modulů druhé a třetí generace, tj. tenkovrstvé a tandemové články, se zaměřením na články a moduly z amorfního křemíku. V rámci vývoje oboru došlo ale k výraznému technologickému pokroku v oblasti článků a modulů z krystalického křemíku s následným růstem účinnosti a poklesem ceny, takže moduly z amorfního křemíku přestaly být konkurenceschopné a došlo k útlumu produkce v této oblasti. Po posouzení celkové situace i laboratorního vybavení, bylo v rámci odborné rozpravy upraveno zaměření výzkumu na degradační procesy fotovoltaických modulů v aplikacích, zejména pak na problémy spojené s PID.

4 Fotovoltaický článek - funkce a základní charakteristiky

4.1 Fyzikální podstata fotovoltaického článku

Fotoelektrický jev je možné rozdělit do dvou skupin. V případě, že jev probíhá na povrchu látky a působením elektromagnetického záření jsou elektrony uvolňovány do okolního prostředí, nazýváme takovou situaci vnějším fotoelektrickým jevem. V případě fotovoltaického jevu se jedná o takzvaně vnitřní fotoelektrický jev, který probíhá při ozáření určitých druhů polovodičů, kdy dodáním kvanta energie se elektron neuvolní z látky, ale pouze se z něj stane volný elektron v látce.

Při dopadu záření na povrch materiálu se část odrazí a část vnikne do materiálu. Budeme-li uvažovat tok fotonů odpovídající vlnové délce λ , do materiálu vstupuje povrchem tok fotonů $\Phi_0(\lambda)$.

$$\Phi_0(\lambda) = \Phi_{in}(\lambda) * (1 - \mathfrak{R}(\lambda)) \quad (4.1)$$

kde $\Phi_{in}(\lambda)$ je fotonový tok dopadajícího světla na povrch materiálu. Symbolem \mathfrak{R} je označována odrazivost (reflexivita povrchu), která však závisí na energii fotonu.

Při průchodu světla materiálem vlivem absorpce tok fotonů klesá se vzdáleností od povrchu

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha x) \quad (4.2)$$

kde α je absorpční koeficient, který závisí na vlnové délce λ dopadajícího záření. Absorpce fotonu znamená předání jeho energie částicím materiálu. Pokud dochází k interakci fotonu s kmity mřížky nebo volnými elektrony, dochází ke zvýšení střední kinetické energie těchto částic a tedy ke zvýšení teploty. U materiálů s kovalentní vazbou může při interakci fotonu s dostatečně vysokou energií (musí být splněna podmínka $h\nu > W_g$) dojít k uvolnění elektronu z vazby. U polovodičů tak vzniká pár elektron-díra; oba typy nosičů náboje se mohou pohybovat v materiálu a přenášet náboj. Energie fotonu vyšší nežli W_g je posléze předána mřížce ve formě tepla, tzv. termalizace. V případě, že je energie fotonu nižší než W_g , foton může být zachycen pouze na poruchách mřížky, přičemž absorpční koeficient je nízký a polovodič se jeví pro dané záření jako transparentní. Pokud je polovodič v termodynamické rovnováze, mezi koncentrací elektronů n_0 a koncentrací děr p_0 platí vztah

$$n_0 p_0 = n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right), \quad (4.3)$$

kde B je materiálová konstanta.

Interakcí se zářením je narušena termodynamická rovnováha. Pokud n_0 byla koncentrace elektronů v termodynamické rovnováze (neozářeném materiálu), vlivem absorpce záření a následné generaci párů elektron-díra se zvýší koncentrace elektronů na hodnotu $n = n_0 + \Delta n$

a zároveň se zvýší koncentrace děr z hodnoty p_0 odpovídající termodynamické rovnováze na hodnotu $p = p_0 + \Delta p = p_0 + \Delta n$. Přírůstek koncentrace volných nosičů náboje Δn se obvykle nazývá koncentrace nerovnovážných nosičů.

Pro generaci nosičů náboje absorpcí světla (fotonů), lze předpokládat, že čím více fotonů je absorbováno, tím větší je koncentrace nerovnovážných nosičů. Vznikne-li při interakci β párů elektron-díra, pak pro záření s vlnovou délkou λ je generace nosičů (počet párů elektron-díra generovaných za jednotku času ve vzdálenosti x od povrchu) dána vztahem [3]:

$$\left(\frac{d\Delta n(\lambda; x)}{dt}\right)_{gen} = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi(\lambda, x) = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi_0(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (4.4)$$

kde $\alpha(\lambda)$ je absorpční koeficient, $\Phi(\lambda, x)$ tok fotonů ve vzdálenosti x pod povrchem. Celková generace $\left(\frac{d\Delta n(x)}{dt}\right)_{gen}$ je pak dána integrací přes spektrum dopadajícího záření.

Generací párů elektron – díra dochází k porušení termodynamické rovnováhy, což vede ke snaze materiálu rovnováhu obnovit. Dochází tak k procesu rekombinace, tj. návratu volného elektronu do neobsazeného stavu ve valenčním pásu, což je anihilace páru elektron-díra spojená s rozptylem nadbytečné energie. Mezi tři nejvýznamnější mechanismy rekombinace patří zářivá rekombinace, Augerova rekombinace a rekombinace přes lokální rekombinační centra [4].

Při zářivé rekombinaci se energie vyzáří ve formě fotonu, při Augerově rekombinaci je energie předána elektronu nebo díře, která se nachází poblíž, zvýší kinetickou energii částice, která ji postupně předá mřížce emisí fononů, tj. ve formě tepla. V případě třetího typu dochází k rekombinaci díky záchytným centrům, která se nacházejí v zakázaném pásu. Při zachycení elektron zrekombinuje a přebytečnou energii vyzáří ve formě tepla (fononu). Čím více je těchto záchytných center, tím vyšší je pravděpodobnost rekombinace. Rychlost rekombinace je charakterizována efektivní dobou života elektronů (nosičů náboje) a je dána vztahem [4]

$$\left(\frac{d\Delta n}{dt}\right)_{rek} = -\frac{\Delta n}{\tau} = -\Delta n \left(\frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Au}} + \frac{1}{\tau_t}\right) \quad (4.5)$$

kde Δn je koncentrace nerovnovážných nosičů,

τ je doba života nerovnovážných nosičů náboje,

τ_{rad} doba života nerovnovážných nosičů při zářivé rekombinaci,

τ_{Au} doba života nerovnovážných nosičů při Augerově rekombinaci,

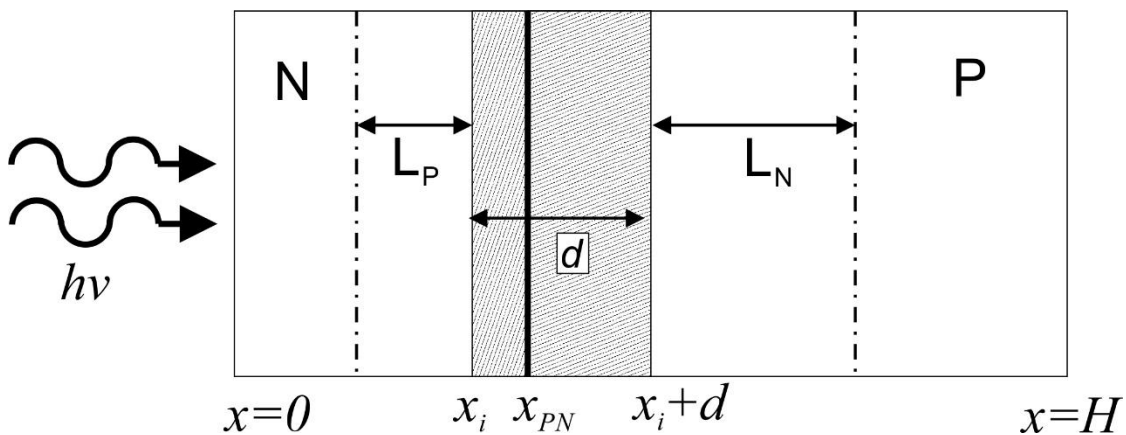
τ_t doba života nerovnovážných nosičů při rekombinaci na lokálních centrech.

Při konstantním toku fotonů se ustálí dynamická rovnováha mezi generací a rekombinací nosičů, takže $\left(\frac{d\Delta n}{dt}\right) = \left(\frac{d\Delta n}{dt}\right)_{gen} + \left(\frac{d\Delta n}{dt}\right)_{rek} = 0$. Koncentrace nerovnovážných nosičů v dynamické rovnováze je pak dána vztahem

$$\Delta n = \tau \left(\frac{d\Delta n}{dt}\right)_{gen} \quad (4.6)$$

Pokud záření dopadá na homogenní polovodič, nevzniká na něm rozdíl potenciálů, protože koncentrace nerovnovážných elektronů a děr se sobě rovnají. Ke vzniku fotovoltaického napětí je třeba nehomogenní struktura s vestavěným elektrickým polem (přechod PN, heteropřechod, kontakt polovodič-kov, apod.) kde vlivem vestavěného elektrického pole jsou páry elektron-díra rozděleny a část struktury, do které jsou polem urychlovány elektrony, se nabíjí záporně a část struktury, do které jsou urychlovány díry, se nabíjí kladně. Pokud jsou obě části propojeny vnějším obvodem, protéká jím proud. Vzniká tak fotovoltaický článek.

Pro ilustraci je na Obr. 1 znázorněna struktura s PN přechodem v hloubce x_i pod povrchem, na který dopadá záření.



Obr. 1 Šířka OPN

V ozářené oblasti jsou generovány nerovnovážné nosiče, které difundují směrem k přechodu PN. Hustota proudu J_{PV} je tvořena nosiči které byly zachyceny oblastí prostorového náboje, ve které je silné elektrické pole. Nosiče, generované mimo oblast prostorového náboje (místa přechodu PN) musí k oblasti se silným elektrickým polem difundovat. Pokud rekombinují dříve, než dosáhnou oblasti přechodu PN, neuplatní se při generaci fotovoltaického napětí. Kromě rekombinace v objemu materiálu dochází ještě k povrchové rekombinaci označované S_R a generaci nosičů náboje přímo uvnitř oblasti prostorového náboje s hustotou

proudu J_{OPN} . Proudová hustota $J_{PV}(\lambda)$ generovaná zářením o vlnové délce λ je pak dána součtem jednotlivých složek.

$$J_{FVN}(\lambda) = q \left[\int_0^{x_i} \left(\frac{d\Delta n(x; \lambda)}{dt} \right)_{gen} dx - \int_0^{x_i} \frac{\Delta n(x; \lambda)}{\tau} dx - S_R(0) \right] \quad (4.7)$$

$$J_{FVP}(\lambda) = q \left[\int_{x_i+d}^H \left(\frac{d\Delta n(x; \lambda)}{dt} \right)_{gen} dx - \int_{x_i+d}^H \frac{\Delta n(x; \lambda)}{\tau} dx - S_R(H) \right] \quad (4.8)$$

$$J_{FV}(\lambda) = J_{FVN}(\lambda) + J_{FVP}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda) \quad (4.9)$$

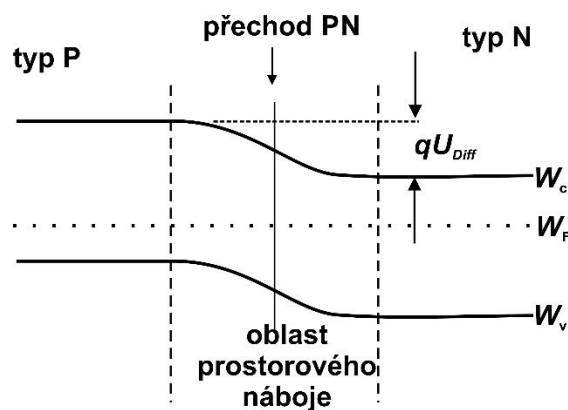
Pokud dopadající záření není monochromatické, získá se výsledná hustota generovaného proudu integrací $J_{FV} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} J_{FV}(\lambda) d\lambda$.

Nejčastěji se používá model strmého přechodu PN, především z hlediska relativně jednoduchého matematického aparátu.

V termodynamické rovnováze při teplotách blízkých pokojovým (pro křemík 100K – 500K) je v polovodiči typu P s hustotou stavů ve valenčním pásu N_v poloha Fermiho hladiny $W_{F(P)}$ určována koncentrací akceptorů N_A (koncentrace děr $p_{p0} = N_A$), $W_{F(P)} = -W_g + kT \ln \frac{N_v}{N_A}$. V polovodiči typu N s hustotou stavů ve vodivostním pásu N_c a koncentrací donorů N_D (koncentrace elektronů $n_{n0} = N_D$) je poloha Fermiho hladiny $W_{F(N)}$ dána vztahem $W_{F(N)} = kT \ln \frac{N_D}{N_c}$. Při spojení materiálů typu P a typu N je v termodynamické rovnováze jediná konstantní energie W_F a vzniká mezi polohou vodivostního pásu v oblastech typu P a typu N rozdíl energií $W_{F(N)} - W_{F(P)}$, takže na přechodu PN vzniká rozdíl energetická bariéra, jejíž velikost je možno vyjádřit pomocí tzv. difúzního potenciálu

$$U_{Dif} = \frac{W_{F(N)} - W_{F(P)}}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (4.10)$$

Situaci znázorňuje Obr. 2 (W_v energie valenčního pásu, W_c energie vodivostního pásu) [5].



Obr. 2 Difúzní napětí – pásový diagram

Na rozhraní obou typů materiálů dochází vlivem gradientu koncentrace k difúzi elektronů z oblasti typu N do oblasti typu P, vlivem vnitřního elektrického pole na rozhraní jsou elektrony z oblasti typu P driftovány do oblasti typu N. V termodynamické rovnováze je výsledný proud nulový. Pokud je rovnováha porušena přiložením vnějšího napětí U_j na přechod, změní se výška potenciálové bariéry. Pokud $U_j > 0$ (+ na typu P), snižuje se výška bariéry a proud difúze elektronů z oblasti typu N do oblasti typu P převyšuje drift elektronů z oblasti typu P do oblasti typu N. Stejně dochází ke zvýšení difúze děr z oblasti typu P do oblasti typu N. Výsledný proud je možno popsat pomocí

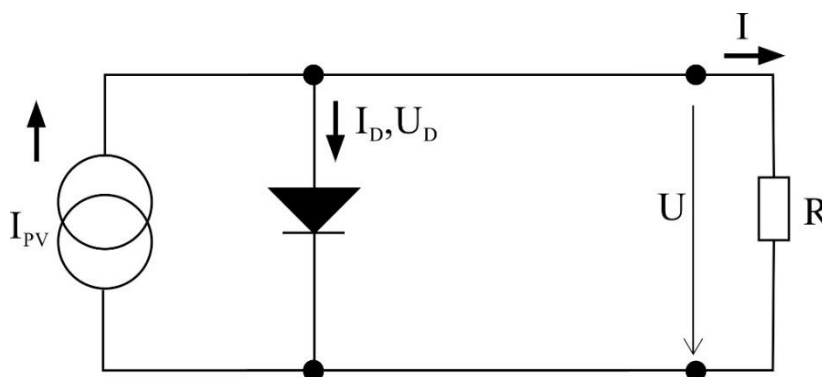
$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_j}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.11)$$

4.2 Náhradní model ideálního fotovoltaického článku

Charakteristiky fotovoltaických článků lze modelovat superpozicí světlem generovaného proudu I_{PV} a VA charakteristiky PN přechodu. Tuto situaci je možné znázornit jako zdroj proudu spojeného paralelně s diodou připojenou k externí zátěži, jak je znázorněno na Obr. 3

Pro náhradní schémata fotovoltaického článku se používají nejčastěji následující modely:

Model 1: Jedná se o model ideálního článku, bez uvažování vlivu parazitních odporů [6].



Obr. 3 Náhradní schéma ideálního fotovoltaického článku.

$$I = I_{PV} - I_D = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_j}{\xi_1 kT}\right) - 1 \right] \quad (4.12)$$

kde T – termodynamická teplota

k – Boltzmannova konstanta

q – elementární náboj elektronu

I_0 – saturační proud

ξ_1 – diodový faktor (v případě saturačního proudu obvykle uvažován jako roven jedné)

Saturační (difuzní, někdy také nazýván závěrný) proud je dále dán vztahem:

$$I_0 = q \cdot A \left(\frac{D_n}{L_n} \cdot \frac{1}{p_{P0}} + \frac{D_p}{L_p} \cdot \frac{1}{n_{N0}} \right) \cdot n_i^2 \quad (4.13)$$

kde A – plocha přechodu

n_{N0} – koncentrace elektronů v oblasti N

p_{P0} – koncentrace děr v oblasti P

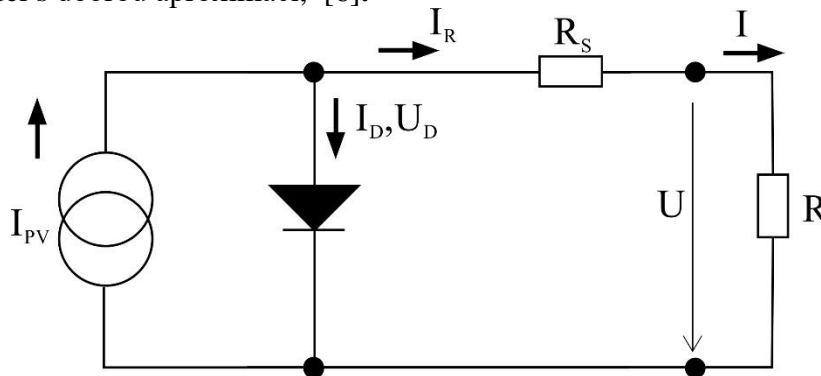
n_i – vlastní koncentrace nosičů náboje

D_n, D_p – difúzní koeficienty

L_p, L_n – střední difusní délka elektronů, resp. děr

V reálném článku proud generovaný OPN přechodu prochází na výstupní kontakty materiálem jednotlivých vrstev a sběrnice, které mají nenulovou rezistivitu. Průchod proudu reálným materiálem můžeme modelovat zařazením odporu R_S do série s přechodem, jak je znázorněno na Obr. 4.

Model 2: Model s dobrou aproximací, [6].

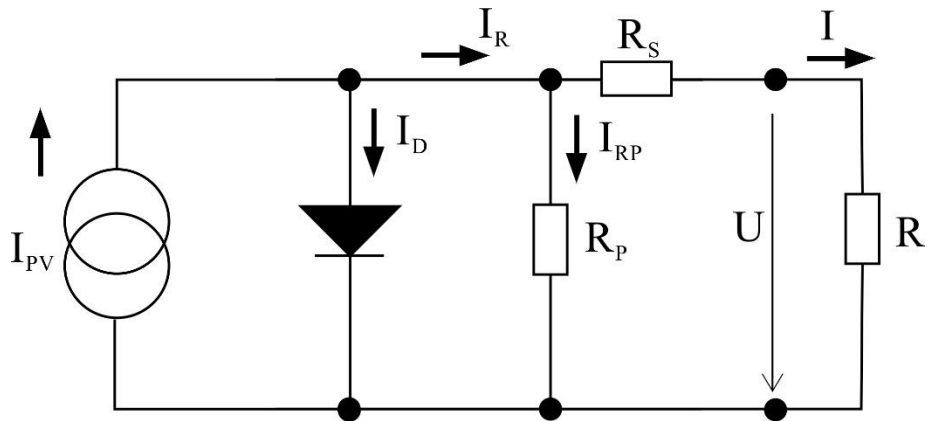


Obr. 4 Náhradní schéma ideálního článku s přidáním sériovým odporem.

Odvození proudu je totožné, jako u předchozího modelu.

$$I = I_{PV} - I_D = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT}\right) - 1 \right] \quad (4.14)$$

Model 3: Dobrá aproximační kvalita modelu, ale model neuvažuje závislost paralelního odporu na ozáření.



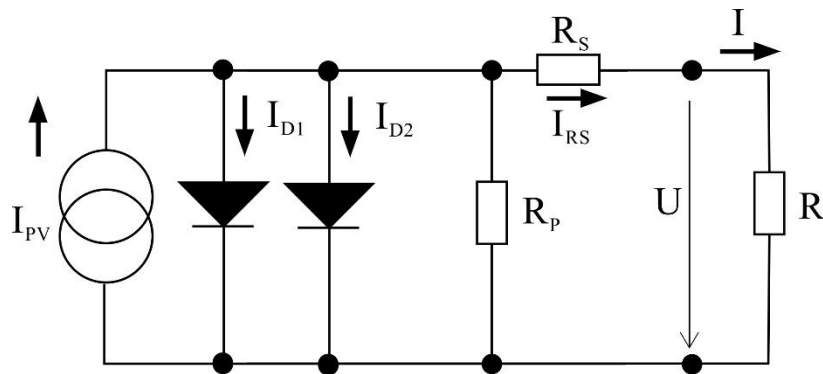
Obr. 5 Náhradní schéma reálného článku, jednodiodový.

$$I = I_{PV} - I_D - I_{RP}$$

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_S}{R_P} \quad (4.15)$$

V případě reálného PN přechodu se mezi oblastmi P a N vytvoří oblast prostorového náboje, kde probíhají generačně rekombinační procesy. Pro tento případ musíme zavést člen, který bude reprezentovat generačně rekombinační složku proudu, druhý diodový faktor ξ_2 reprezentuje energetické hladiny rekombinačních center v OPN. Může nabývat hodnot $\xi_2 \geq 2$.

Model 4: Velmi dobrá aproximační kvalita modelu.



Obr. 6 Náhradní schéma reálného článku, dvou diodový.

Napětí na obou diodách je stejné a lze vyjádřit jako výstupní napětí zvětšené o úbytek napětí na sériovém odporu. Z odvození výstupního proudu v tomto modelu je vidět, že explicitní vyjádření napětí není možné a tudíž pro jeho zjištění bude nutné použít jednu z iteračních metod [7].

$$I = I_{PV} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_2 kT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_S}{R_P} \quad (4.16)$$

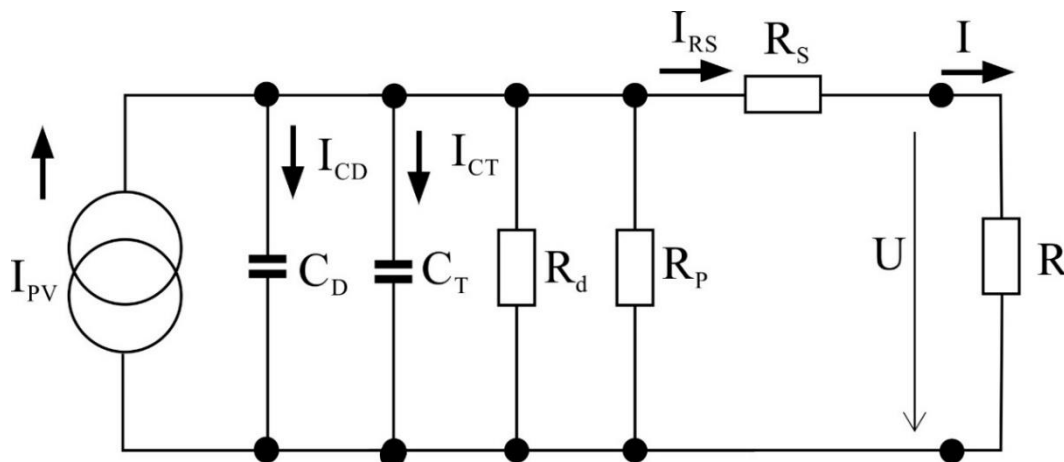
$$I_{02} = \frac{qn_i d}{\tau_{sc}} A \quad (4.17)$$

kde τ_{sc} je doba života volných nosičů náboje, d je šířka oblasti prostorového náboje, která závisí na koncentračním profilu příměsí, difúzním napětí U_{Dif} a přiloženém napětí U .

4.3 Střídavý model fotovoltaického článku

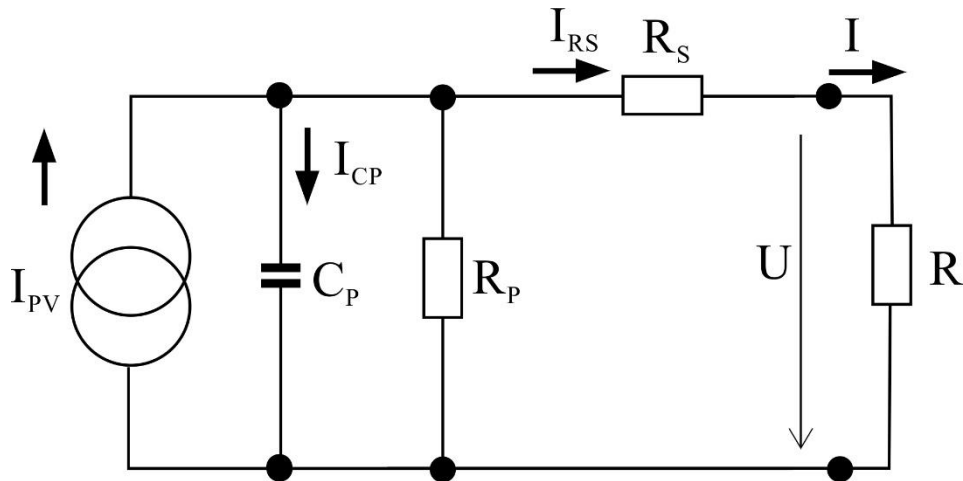
Fotovoltaické (PV) moduly jsou vnímány jako stejnosměrná zařízení. Proto je důležité zkoumání stejnosměrných parametrů. Nicméně velký počet aplikací vyžaduje proud ve střídavém tvaru. Během provozu se v důsledku okolních podmínek (ozáření, teplota, apod.) střídavé parametry FV modulů mění. Výkyvy, které vznikají změnou impedanční složky FV modulu, mohou dle konfigurace systému (zejména návrhu filtrů) vést ke snížení účinnosti celého systému. Proto je při návrhu FV modulů studie střídavých parametrů také důležitá. Střídavé parametry navíc mohou sloužit také pro včasnou diagnostiku poruch.

Střídavé náhradní schéma FV článku uvažuje náhradu diody difúzní kapacitou C_D , přechodovou kapacitou C_T a dynamickým odporem R_d [8]. Difúzní kapacita má původ v difúzi nosičů náboje přes propustně polarizovaný PN přechod, projevuje se tedy při propustném stavu přechodu a vyjadřuje velikost náboje nerovnovážných nosičů, nahromaděného v přechodu a jeho blízkém okolí a její změnu s protékajícím proudem.



Obr. 7 Náhradní schéma PV článku - převzato z [9]

Toto náhradní schéma můžeme zjednodušit tak, že použijeme paralelní odpor R_P místo kombinace R_d a R_P . Kombinací difúzní kapacity C_D a přechodové kapacity C_T nahradíme paralelní kapacitou C_P [9].



Obr. 8 Zjednodušené náhradní schéma - převzato z [9]

4.3.1 Parametry střídavého modelu článku

4.3.1.1 Přechodová kapacita

Přechodová kapacita PN přechodu je závislá na přiloženém napětí. V případě strmého přechodu s koncentrací akceptorů N_A v oblasti typu P a N_D je koncentrace donorů v oblasti typu N, tloušťku oblasti prostorového náboje je možno vyjádřit vztahem.

$$d(U) = \left[\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (U_{Dif} - U) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

Při přiložení napětí v závěrném směru ($U < 0$) se šířka oblasti prostorového náboje zvětšuje, při přiložení napětí v propustném směru ($U > 0$) se šířka OPN zmenšuje. Fotovoltaický článek obvykle pracuje v oblasti napětí $0 \leq U \leq U_{oc} < U_D$.

Symbol $d(U)$ označuje šířku ochuzené vrstvy PN přechodu, ε_0 a ε_r označují permitivitu vakua, respektive relativní permitivitu použitého materiálu PN přechodu.

Při závěrné polarizaci OPN neobsahuje téměř žádné volné nosiče náboje (závěrný proud PN přechodu je velmi malý), takže se ochuzená vrstva chová jako dielektrikum. Z jedné strany k ochuzené oblasti přiléhá oblast polovodiče typu P s volnými děrami s kladným nábojem, ze strany druhé pak oblast polovodiče typu N s volnými elektrony se záporným nábojem. Tato situace připomíná klasický kondenzátor s kladnou a zápornou kovovou elektrodou, které jsou od sebe vzájemně odděleny dielektrikem. Přechod PN se tedy v závěrném směru chová jako rovinný kondenzátor s napěťově závislou kapacitou [10].

Ve zcela obecném případě se kapacita definuje jako poměr změny náboje a změny přiloženého napětí. V případě PN přechodu se dá z tohoto vztahu vycházet také.

$$C = \left| \frac{dQ}{dU} \right| \quad (4.19)$$

Při určitém závěrném napětí U na PN přechodu má ochuzená vrstva šířku x_N v oblasti typu N a x_P v oblasti typu P. V ochuzené vrstvě v polovodiči typu N je prostorový náboj ionizovaných donorů a v polovodiči typu P stejně velký prostorový náboj ionizovaných akceptorů.

$$Q = qAN_D x_N = qAN_A x_P \quad (4.20)$$

Pokud se závěrné napětí na přechodu zvětší o ΔU , zvětší se šířky ochuzených vrstev o Δx_N , resp. o Δx_P . Tyto vrstvy Δx_N a Δx_P byly původně elektricky neutrální, tzn. že náboj ionizovaných donorů byl kompenzován nábojem volných elektronů, resp. náboj ionizovaných akceptorů nábojem volných děr. Při vzrůstu napětí o ΔU z nich odtečou volné elektrony a díry směrem ke kontaktům a zvětší se nepohyblivý prostorový náboj ochuzené vrstvy tvořený ionizovanými donory a akceptory o

$$\Delta Q = qAN_D \Delta x_N = qAN_A \Delta x_P \quad (4.21)$$

Při snížení závěrného napětí naopak do vrstev Δx_N a Δx_P přitečou volné elektrony a díry z kontaktů, vykompenzují náboj ionizovaných donorů a akceptorů a náboj ochuzené vrstvy se zmenší. Tyto změny náboje způsobují vznik bariérové kapacity. Poměr změny náboje a změny napětí, resp. derivace malé změny je [10]:

$$\lim_{\Delta U \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta Q}{\Delta U} \right| = \left| \frac{dQ}{dU} \right| = qAN_D \left| \frac{dx_N}{dU} \right| = qAN_A \left| \frac{dx_P}{dU} \right| = A \left[\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_r}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{U_{Dif} - U} \right]^{1/2} = C_T \quad (4.22)$$

kde ε_0 – permitivita vakua $8,85 \times 10^{-12}$ F/m

ε_r – relativní permitivita materiálu (u křemíku $\varepsilon_r = 11,7$)

U_{Dif} – difúzní napětí

U – přiložené napětí

Pro malá napětí v propustném směru (u křemíku pro $U < 8kT/q$) je proud přechodem stále velmi malý (jedná se o proud převážně majoritních nosičů) a na OPN je možno nahlížet jako na dielektrikum a pro vyjádření kapacity PN přechodu použít vztah (4.22). Všechny uvedené vztahy platí pro strmý PN přechod.

4.3.1.2 Difúzní kapacita článku

Pokud je na PN přechodu přiloženo stejnosměrné napětí v propustném směru, kterým se nastaví vhodný pracovní bod a na kterém je nesuperponovaný malý střídavý signál, je celkové napětí na PN přechodu dáno rovnicí:

$$u(t) = U + u_m \exp(i\omega t) \quad (4.23)$$

V uvedeném vztahu (4.23) zastupuje U stejnosměrnou složku přiloženého napětí, druhá část vztahu potom představuje střídavou složku o amplitudě u_m . Platí přitom, že $u_m \ll U$. Malá střídavá složka způsobí, že napětí na PN přechodu kolísá v malém intervalu podle rovnice

$$U - u_m \leq u \leq U + u_m \quad (4.24)$$

Hodnota napětí na PN přechodu tedy kolísá kolem střední hodnoty U a to vede k tomu, že se snižuje nebo zvyšuje výška potenciálové bariéry PN přechodu.

V důsledku změny výšky potenciálové bariéry se snižuje nebo zvyšuje počet elektronů vstříkovaných z oblasti N do P a počet děr vstříkovaných z oblasti P do N. Z tohoto důvodu tedy také kolísá i proud procházející PN přechodem. Malá změna napětí na PN přechodu tedy vede k tomu, že se změní celkový elektrický náboj vstříkovaný z jedné oblasti PN přechodu do druhé. Změna náboje vyvolaná změnou napětí je podle obecné definice kapacita, v tomto případě, jelikož se jedná převážně o difúzní charakter proudu PN přechodem, je kapacita nazývána **difúzní** [11] .

$$C_D = \frac{dQ}{dU} = \frac{dQ}{dI} \frac{dI}{dU} = \tau \frac{qI}{kT} \quad (4.25)$$

4.3.1.3 Dynamický odpor

Budeme-li aplikovat rychlé změny, bude se fotovoltaický článek chovat jako impedance, jejíž reálnou část můžeme označit jako dynamický odpor R_d a imaginární část za kapacitu (když zanedbáme indukčnost přívodů).

V případě charakteristiky neosvětleného článku či modulu, se V-A charakteristika, kdy se z modulu po připojení napětí v propustném směru stává spotřebič, mění na tvar

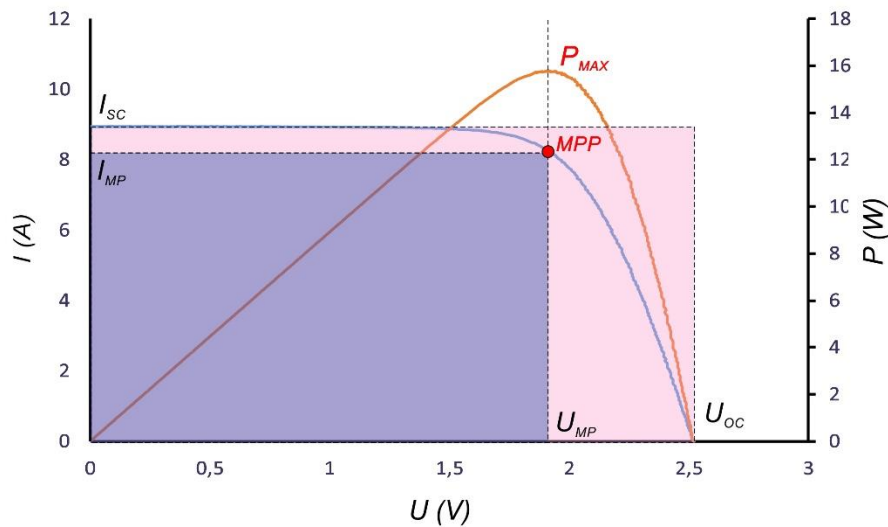
$$I = I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{\xi_1 kT}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_S)}{\xi_2 kT}\right) - 1 \right] + \frac{U - IR_S}{R_P} \quad (4.26)$$

Změřením této charakteristiky můžete získat informace o vlastnostech diody. Bude-li přiložené napětí střídavé, bude nutno uvažovat i kapacitní složky. Touto problematikou se zabývá kapitola 8.6 Impedanční spektroskopie.

4.4 Parametry fotovoltaického článku

Voltampérová charakteristika ozářeného FV článku je znázorněna na Obr. 9. Pokud článek není zatížen spotřebičem, můžeme na kontaktech naměřit napětí naprázdno U_{OC} (u křemíkového článku obvykle 0,6 V). Při zkratování, kdy článek je ve stavu nakrátko, protéká obvodem maximální možný proud I_{SC} . Mezi těmito extrémními body leží tzv. bod maximálního

výkonu MPP, kdy je součin napětí a proudu maximální. V tomto bodě je hodnota napětí a proudu značena U_{MP} a I_{MP} .



Obr. 9 Volt ampérová charakteristika článku

4.4.1 Proud nakrátko

Proudem nakrátko rozumíme maximální proud, který lze z článku získat při spojení nakrátko při dané ozáření. Označuje se I_{SC} , u článků s malým sériovým odporem $I_{SC} \approx I_{PV}$ a je přímo úměrný ozáření. Za standardních testovacích podmínek je u křemíkových článků okolo hodnoty 36 mA/cm^2 .

4.4.2 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno je napětí naměřené na svorkách fotovoltaického článku při odpojené zátěži. Značí se U_{OC} , které závisí na teplotě a ozáření. U c-Si článků za standardních testovacích podmínek se hodnota U_{OC} pohybuje okolo $0,6 \text{ V}$.

4.4.3 Bod maximálního výkonu

Bod maximálního výkonu se určuje z naměřených hodnot jako maximum součinu UI (tedy nulová derivace výkonu). Značí se P_{MAX} nebo MPP a při vhodném nastavení výstupních obvodů je článek provozován při odpovídajících parametrech U_{MP} a I_{MP} . [12].

4.4.4 Fill factor

Fill factor FF , činitel plnění, je poměr mezi bodem maximálního výkonu a ideálním výkonem daným hodnotami I_{SC} a U_{OC} :

$$FF = \frac{U_{MP}I_{MP}}{U_{OC}I_{SC}} (-) \quad (4.27)$$

Hodnoty se u dobrých článků pohybují okolo 0,8 a závisí zejména na kvalitě PN přechodu.

4.4.5 Účinnost

Účinnost je obecně charakterizována jako poměr maximálního výkonu ke vstupnímu příkonu P_{IN} . V případě solárních článků představuje vstupní příkon osvětlení článku a výstupní bod maximálního výkonu:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{IN}} = \frac{U_{MP}I_{MP}}{P_{IN}} (-) \quad (4.28)$$

4.4.6 Parazitní odpory

4.4.6.1 Sériový odpor

Sériový a paralelní odpor R_S a R_P můžeme považovat za měřítko kvality fotovoltaického článku. Jak dobré nebo přesné měřítko představují parazitní odpory, závisí na přesnosti určení těchto odporů. Získané hodnoty odporů závisejí na tom, jak se použítá aproximace blíží realitě. Norma ČSN EN 60904-1 předepisuje metody určení odporu za předem definovaných podmínek. Tyto podmínky jsou velmi zjednodušeny a mnoho vlivů se v nich zanedbává. Jak, je zřejmé ze (4.16), je zde 6 parametrů, které ovlivňují V-A charakteristiku a při použití zvolené metody je třeba dobře analyzovat, zda použítá zjednodušení nemají vliv na přesnost výsledku.

Metoda určování sériového odporu z jedné V-A charakteristiky s uvažováním paralelního odporu

Při výpočtech se vychází z rovnice (4.15), která popisuje proud tekoucí jedno-diodovým modelem článku pro ustálený stav, při stále stejné ozářenosti. Všechny parametry kromě U a I jsou považovány za konstantní. Možnosti získání sériového odporu z jedné V-A charakteristiky jsou uvedeny např. v [13].

Základní rovnici (4.15) pro 1-diodový FV článek můžeme upravit na tvar

$$R_p(I - I_{PV} - I_0) + IR_S = -I_0 R_p \exp\left[\frac{q}{\xi_1 kT}(U + IR_S)\right] - U \quad (4.29)$$

Pro $R_p \rightarrow \infty$, můžeme předpokládat že:

$$I_0 R_p \exp\left[\frac{q}{\xi_1 kT}(U + IR_S)\right] \gg U \quad (4.30)$$

Tato podmínka je splněna u reálných FV článků pro kladné napětí, v okolí U_{OC} je možné upravit rovnici (4.29) na tvar

$$U = \frac{\xi_1 kT}{q} \ln\left[\frac{R_p[I_{PV} + I_0 - I] - IR_S}{I_0 R_p}\right] - IR_S \quad (4.31)$$

Za předpokladu, že $I = 0$ a $U = U_{OC}$ a dosazení do rovnice (4.29) získáme vztah:

$$U_{OC} = \frac{\xi_1 kT}{q} \ln\left[\frac{I_{PV} + I_0}{I_0}\right] \quad (4.32)$$

Podmínku pro maximální výkon ($P = U \cdot I$) je možné zapsat ve tvaru:

$$\left(\frac{dP}{dU}\right) = 0 \quad (4.33)$$

který je ekvivalentní s podmínkou:

$$\left(\frac{dP}{dI}\right)_{Max} = 0 \quad (4.34)$$

Použitím podmínky (4.33) v rovnici (4.32) dostaneme výraz:

$$U_{MP} - I_{MP} \frac{\xi_1 kT}{q} \left[\frac{R_p + R_S}{R_p[I_{PV} + I_0 - I_{MP}] - I_{MP} R_S}\right] - I_{MP} R_S = 0 \quad (4.35)$$

Rovnici (4.35) je možné také přepsat do tvaru

$$R_S = \frac{U_{MP}}{I_{MP}} - \frac{\xi_1 kT}{q} \left[\frac{R_p + R_S}{R_p[I_{PV} + I_0 - I_{MP}] - I_{MP} R_S}\right] = 0 \quad (4.36)$$

Za předpokladu, že $R_p \rightarrow \infty$

$$R_S = \frac{U_{MP}}{I_{MP}} - \frac{\xi_1 kT}{q} \left[\frac{1}{[I_{PV} + I_0 - I_{MP}]}\right] \quad (4.37)$$

Rovnice (4.37) umožňuje vyjádřit R_S z jedné V-A charakteristiky, ovšem takto stanovená hodnota může být ovlivněna dalšími parametry.

V případě, že se chceme vyhnout nutnosti najít bod maximálního výkonu, lze řešit výraz (4.36) jako kvadratickou rovnici. Následně je nutné zvolení dvou bodů (U_1, I_1, U_2, I_2) na V-A charakteristice.

$$R_S = \frac{\xi_1 kT}{q(I_2 - I_1)} \ln\left[\frac{R_p(I_{PV} + I_0 - I_2) - I_2 R_S}{R_p(I_{PV} + I_0 - I_1) - I_1 R_S}\right] - \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} \quad (4.38)$$

Za předpokladu že:

$$\frac{I_{1,2}R_S}{R_P} \ll I_{PV} + I_0 - I_{1,2} \quad (4.39)$$

a současného zanedbání hodnoty I_0 je možné vyjádřit odhadovanou hodnotu R_S rovnicí:

$$R_S = \frac{\xi_1 kT}{q(I_2 - I_1)} \ln \left[\frac{I_{PV} - I_2}{I_{PV} - I_1} \right] - \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} \quad (4.40)$$

Metoda derivace rovnice v krajních bodech VA charakteristiky

Metoda využívající derivaci rovnice v krajních bodech VA charakteristiky určuje sériový a paralelní odpor R_S a R_P jako směrnice tečen. Krajními body je myšleno, na ose proudu je to bod I_{SC} ($U = 0$), zkratový proud. Na ose napětí je to bod $U = U_{OC}$ ($I = 0$), napětí otevřeného obvodu. Tato metoda je používána také solárním simulátorem Pasan SunSim IIIc, při nízké ozářenosti, je metoda zatížena systematickou chybou a proto odhadovanou hodnotu odporu označujeme jako R_S^* .

$$f(I(U), U) = I - I_{PV} + I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_2 kT} \right) - 1 \right] + \frac{U + R_S I}{R_P} \quad (4.41)$$

Diferenciál funkce (4.42) $\frac{dU}{dI}$, který vyjadřuje směrnici tečny v bodě U_{OC} ($I = 0$).

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial I(U)} dI(U) + \frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U} dU = 0 \quad (4.42)$$

Pak partiální derivace funkce dle proměnných $I(U)$ a U jsou

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial I(U)} = 1 + I_{01} \frac{qR_S}{\xi_1 kT} \exp \left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT} \right) + I_{02} \frac{qR_S}{\xi_2 kT} \exp \left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_2 kT} \right) + \frac{R_S}{R_P} \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U} = \frac{qI_{01}}{\xi_1 kT} \exp \left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT} \right) + \frac{qI_{02}}{\xi_2 kT} \exp \left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_2 kT} \right) + \frac{1}{R_P} \quad (4.44)$$

Dále je potřeba dosadit derivace (4.43) a (4.44) do rovnice (4.42) Po dosazení bodu $U = U_{OC}$ a úpravách dostáváme vyjádření tečny v daném bodě, které reprezentuje vnitřní dynamický odpor fotovoltaického článku v bodě $U = U_{OC}$.

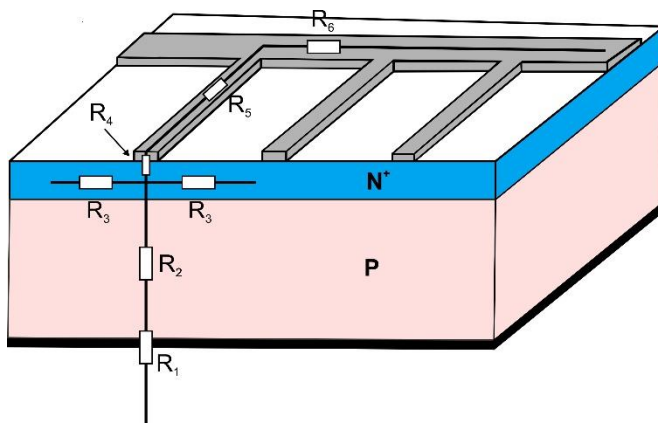
$$\frac{dU}{dI} = -R_S - \frac{1}{\frac{qI_{01}}{\xi_1 kT} \exp \left(\frac{q(U_{OC})}{\xi_1 kT} \right) + \frac{qI_{02}}{\xi_2 kT} \exp \left(\frac{q(U_{OC})}{\xi_2 kT} \right) + \frac{1}{R_P}} \quad (4.45)$$

Flash tester Pasan IIIc využívá pro stanovení sériového odporu vztah $R_S^* = -\frac{dU}{dI}_{U=U_{OC}}$

a zanedbává druhý člen rovnice (4.45). Toto zanedbání je použitelné, v případě dostatečně velká ozáření a dostatečně velkého paralelního odporu. Pokud tyto podmínky nejsou splněny, je třeba provádět korekce odporu vyhodnoceného z derivace. Pro určité zjednodušení je možno počítat, že s rostoucím napětím se I_{02} zmenšuje, takže pro $U = U_{oc}$ je možno uvažovat $\frac{qI_{01}}{\xi_1 kT} \exp\left(\frac{q(U_{oc})}{\xi_1 kT}\right) \gg \frac{qI_{02}}{\xi_2 kT} \exp\left(\frac{q(U_{oc})}{\xi_2 kT}\right)$ a zanedbat druhý člen ve jmenovateli.

Závislost odporu R_s na ozáření

Při stanovení sériového odporu se obvykle předpokládá jeho nezávislost na ozáření, nicméně závislost R_s na ozáření byla prokázáno např. v publikaci [14]. Sériový odpor článku sestává z odporu absorbujícího materiálu, kontaktního odporu, odporu sběrnice. Stručné znázornění pro c-Si článek je na Obr. 10 [15]



Sériový odpor R_s sestává z:
 R_1 -kontakt kov-polovodič na zadním kontaktu
 R_2 -odpor materiálu báze
 R_3 -laterální odpor vrstvy typu N
 R_4 -kontakt kov-polovodič
 R_5 -odpor „prstu“ sběrnice
 R_6 - odpor hlavní sběrnice

Obr. 10 Znázornění sériového odporu, převzato z [16].

Sériový odpor R_s je možno vyjádřit

$$R_s = \sum_{i=1}^6 R_i \quad (4.46)$$

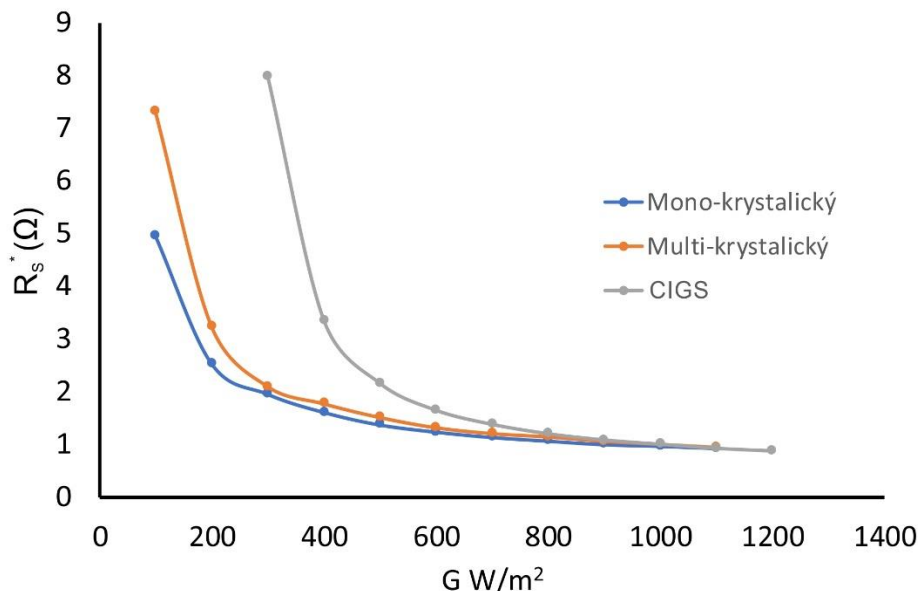
Ze složek sériového odporu může záviset na ozáření pouze složka R_2 , kterou je možno vyjádřit ve tvaru $R_2 = \rho_m \frac{h}{A}$, h je tloušťka vrstvy, A je plocha článku a ρ_m je rezistivita materiálu, závisí v ozářeném polovodiči na koncentraci nosičů

$$\frac{1}{\rho_m} = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta n)\mu_p] \quad (4.47)$$

přičemž přírůstek koncentrace nosičů Δn je přímo úměrný ozáření G . Následně můžeme vyjádřit

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{1}{\rho_0} + \Psi G \quad (4.48)$$

kde ρ_0 je rezistivita neosvětleného materiálu a Ψ je konstanta úměrnosti mezi Δn a G . Změna rezistivity při ozáření silně závisí na úrovni injekce. Dokud je injekce malá, tj. $\Delta n \ll n_0 + p_0$, je změna rezistivity také velmi malá. Vliv ozáření se projeví až po dosažení střední, nebo vysoké injekce nosičů, tj. buď při velmi vysoké ozáření, nebo při nízké koncentraci dotujících příměsí (tj. vysoké ρ_0). Tato změna se projeví pouze u složky R_2 , takže relativní změna celkového sériového odporu je $\frac{\Delta R_s}{R_s} = \frac{\Delta R_2}{\sum_1^6 R_i}$. Principiální pokles sériového odporu s rostoucí ozáření závisí na celkové konstrukci fotovoltaického článku a nemusí být velký. Nicméně bylo zjištěno, že sériový odpor modulu odhadovaný ze směrnice tečny v krajním bodě charakteristiky významně klesá s ozářením. Příklady naměřených závislostí jsou znázorněny na Obr. 11, podrobněji se tímto zabývá kapitola 4.4.6.3



Obr. 11 Vliv ozáření na odhad R_s^* pomocí směrnice tečny v blízkosti U_{oc}

4.4.6.2 Paralelní odpor

Paralelní odpor je ovlivněn především ztrátami (zkratky) na hranách článku. Projevují se zde také krystalové defekty a částice cizích příměsí v oblasti přechodu. Jeho přesné určení je nezbytné pro využití paralelního odporu jako ukazatele intenzity degradace fotovoltaického modulu. Existuje několik metod určení velikosti paralelního odporu včetně metody podle normy ČSN EN 60891.

Metoda derivace rovnice v krajních bodech VA charakteristiky

Tato metoda je používána také solárním simulátorem Pasan SunSim IIIc, při nízké ozáření, je metoda zatížena systematickou chybou a proto odhadovanou hodnotu odporu označujeme jako R_P^* .

Uvažujme 1-diodový model FV článku dle rovnice (4.15). Obdobně lze postupovat i při 2-diodovém modelu. Vyjádření V-A charakteristiky dle rovnice (4.15) upravíme na tvar

$$If(I(U), U) = I - I_{PV} + I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT}\right) - 1 \right] + \frac{U + IR_S}{R_P} \quad (4.49)$$

Diferenciál funkce, z kterého vyjdeme, je rovnice (4.50). Proměnná proud I je funkcí $I(U)$ napětí U .

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial I(U)} dI(U) + \frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U} dU = 0 \quad (4.50)$$

Pak parciální derivace funkce dle proměnných $I(U)$ a U jsou

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial I} = 1 + \frac{qR_S I_0}{\xi_1 kT} \exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT}\right) + \frac{R_S}{R_P} = 0 \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U} = \frac{qI_0}{\beta \xi_1 kT} \exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{\xi_1 kT}\right) + \frac{1}{R_P} = 0 \quad (4.52)$$

Pro paralelní odpor R_P vyjádříme sklon tečny V-A charakteristiky fotovoltaického článku v bodě $I = I_{sc}$ pomocí diferenciálu $\frac{dI}{dU}$. Dosazením derivace (4.51) a (4.52) do rovnice (4.50), rovnosti $I = I_{sc}$ a po příslušných úpravách získáme vztah

$$\frac{dI}{dU} = \frac{1}{R_S + \frac{1}{\frac{1}{R_P} + \frac{q}{\xi_1 kT} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_S}{\xi_1 kT}\right)}} \quad (4.53)$$

Pokud budeme předpokládat, že $R_S \rightarrow 0$ lze vztah (4.53) zjednodušit na tvar

$$\frac{dI}{dU} = \frac{1}{R_P^*} \quad (4.54)$$

Závislost paralelního odporu R_P na ozáření

Využití jedno diodového modelu vnáší do hodnocení paralelního odporu nepřesnosti, zejména za podmínek nízké ozáření. Z tohoto důvodu se často používají modely s dvěma diodami, které však mají tu nevýhodu, že vyžadují stanovení dalších parametrů, což zvyšuje složitost problému. Zajímavým přístupem k problému je tedy vylepšit model s jednou diodou studiem chování parametrů za různých podmínek a následným vhodným přidáním rovnic pro úpravu pro některé z těchto parametrů [17].

Závislost paralelního odporu na ozáření je studována např. v [18], kdy při experimentech porovnávali parametry fotovoltaických článků různých technologií v závislosti na měnící se intenzitě záření v rozsahu od $0,1 \text{ W/m}^2$ do 1000 W/m^2 . Ve všech případech zaznamenali zvýšení

paralelního odporu při nižších intenzitách ozáření. To lze vysvětlit zejména měnící se tloušťkou oblasti prostorového náboje, která se dle rovnice (4.18) s rostoucí injekcí snižuje a tím odpor celé ochuzené vrstvy klesá.

V publikaci [19] je chování R_P s ohledem na ozáření G , popsané v rovnici (4.55). Tento přístup zaručuje platnost pouze v případě velmi nízké úrovně ozáření [19].

$$R_P = R_{P_{ref}} \left(\frac{G_{ref}}{G} \right) \quad (4.55)$$

kde $R_{P_{ref}}$ je paralelní odpor získaný při referenční ozáření $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$

Určení paralelního odporu z naměřené V-A charakteristiky

Tato metoda předpokládá již předchozí znalost hodnoty sériového odporu R_S . To je možné považovat za poměrně značnou nevýhodu této metody, ale opět potvrzuje vzájemnou závislost těchto parametrů fotovoltaického článku. Metoda vychází z 1-diodového modelu Obr. 5 a je potřeba znát V-A charakteristiku v oblasti proudu blízko I_{SC} . V oblasti blízké I_{SC} platí, že $I_D \ll I_{RP}$ a je možné pro další úvahu proud diodou D zanedbat. A model článku z Obr. 5 se redukuje na dělič proudu, přičemž platí vztah (4.56)

$$I_{SC} = I_{PV} \frac{R_P}{R_P + R_S} \quad (4.56)$$

Výsledný proud článku je možné pak vyjádřit jako:

$$I = \frac{-U}{R_P + R_S} + I_{PV} R_P \quad (4.57)$$

Rovnici (4.57) lze upravit na tvar:

$$R_P = \frac{U + I R_S}{I_{PV} - I} \quad (4.58)$$

Pro dva změřené body V-A charakteristiky U_1, I_1 a U_2, I_2 platí podle rovnice (4.58)

$$R_P (I_{PV} - I_1) = U_1 + I_1 R_S \quad (4.59)$$

$$R_P (I_{PV} - I_2) = U_2 + I_2 R_S$$

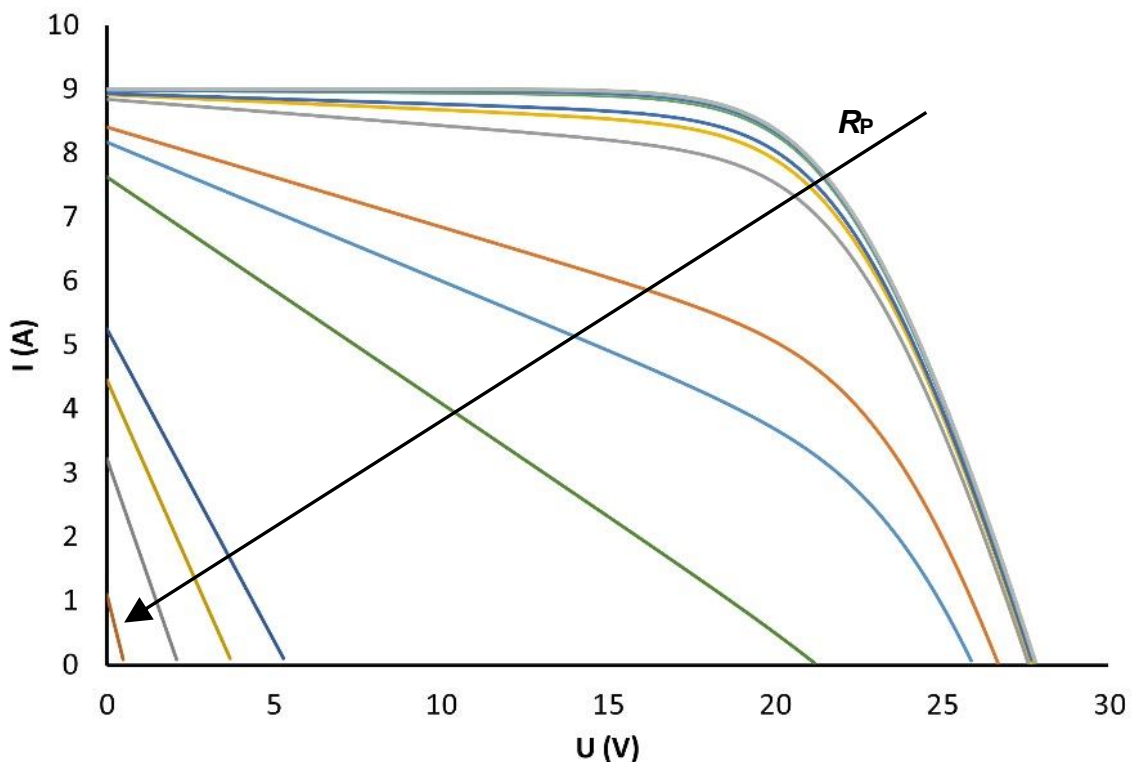
Následně je pak možné R_P vyjádřit jako:

$$R_P = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} - R_S \quad (4.60)$$

4.4.6.3 Omezení použití stanovení parazitních odporů derivací v krajních bodech VACH

Z rovnice (4.45) jde vidět, jak je určení sériového odporu pomocí derivace v krajním bodě ovlivněno nejen diodovým faktorem, ale také právě paralelním odporem R_P . Obvykle je možné při napětí $U = U_{OC}$ uvažovat $I_D \gg I_{RP}$ a zanedbat člen $\frac{1}{R_P}$.

Během práce bylo zjištěno, že pokud je paralelní odpor R_P menší než padesátinásobek odporu R_S je pak následný odhad R_S^* pomocí směrnice tečny v bodě U_{OC} značně nepřesný. Z tohoto důvodu byla provedena simulace v LT Spice pro modul běžných rozměrů a typu (60 článků v sérii, se třemi antiparalelně připojenými Schottkyho diodami). Pro simulaci bylo využito dvoudiodového modelu. Výsledky simulace jsou zobrazeny na Obr. 12 a shrnuty v následující tabulce. Graf i tabulka ukazují, jak se mění odhad sériového a paralelního odporu pomocí směrnice tečny v případě, když v náhradním modelu článku měníme pouze R_P a všechny ostatní parametry jsou zafixovány jako konstantní.



Obr. 12 Vliv paralelního odporu na VA charakteristiku a ovlivnění směrnice v U_{oc}

R_P – nastavený v modelu	R_S^* modulu určený z VACH (při 0%-5% V_{OC})	R_P^* modulu určený z VACH (při 0%-5% I_{SC})
0,06	0,49	0,49
0,24	0,67	0,67
0,42	0,85	0,85
0,6	1,03	1,03
2,4	2,50	2,83
4,2	1,05	4,63
6	0,83	6,43
24	0,67	24,35
42	0,66	36,90
60	0,65	40,48
240	0,64	43,16
420	0,64	44,15
600	0,64	43,23
1200	0,64	44,62
1800	0,64	45,11
2400	0,64	45,35
6000	0,64	43,48

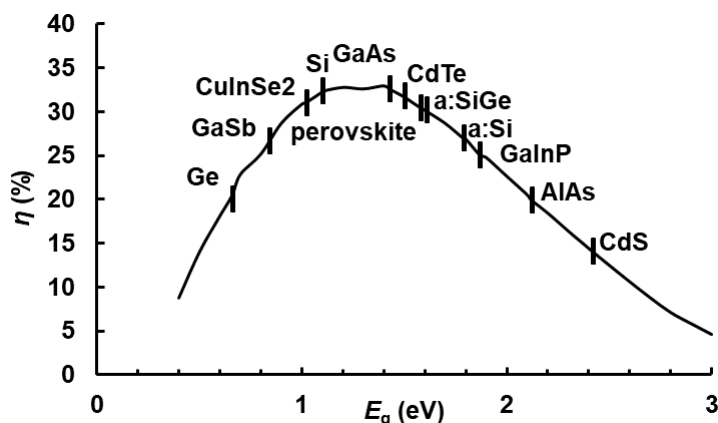
Tabulka 1: Simulace závislosti velikosti sériového a paralelního odporu určeného ze směrnic tečen v krajních bodech VACH při změně R_P v modelu článku.

V případě nastavení extrémně nízkého paralelního obvodu, již VA charakteristika FV článku nemá běžný tvar a odečtení parazitních odporů pomocí směrnic tečny zcela ztrácí význam. V případě, kdy je skutečný sériový odpor vyšší než paralelní, na svorkách modulu již prakticky nelze rozlišit velikost sériového odporu od paralelního, a tudíž ani směrnic určující velikosti těchto odporů nejsou vypovídající – VACH modulu je degradována na lineární závislost určenou právě výsledným odporem (kombinací R_S a R_P). Na vnitřní strukturu již není rozdíl potenciálů a difuzní i rekombinační složka proudu je značně limitována (exponenciální člen v rovnici (4.16) je velmi nízký). U srovnatelného R_S a R_P se již začíná projevovat také difuzní složka proudu (resp. se objevuje chování typické pro diodu) a VACH dostává typický tvar, ačkoliv vnější odpor je stále značně ovlivněn zkratovým chováním struktury. Pro případ vyššího paralelního odporu pro nízké úrovně injekce dominuje složka generačně-rekombinačního proudu a pro vysoké injekce naopak složka difuzní (již je dostatečně velká tloušťka oblasti prostorového náboje). Za povšimnutí stojí také chování samotného R_P^* , kdy při nízkých hodnotách je i nízká hodnota odečteného R_P^* a zároveň od určité nastavené hodnoty R_P (cca 1Ω na článek) již odpor odečtený ze směrnic prakticky neroste. Toto chování lze vysvětlit faktem, že při vyšší hodnotě paralelního odporu se již prakticky neuplatní negativní vliv parazitního odporu (vnitřní odpor článku je již dostatečný, aby zajistil tvrdou VA charakteristiku).

5 Konstrukce a technologie fotovoltaických článků

Principiálně je článek sestaven z polovodiče o vhodné šířce zakázaného pásu, ve kterém se absorbuje většina fotonů a generuje se většina párů elektron-díra. Na straně, ze které dopadá světlo, je vrstva, která tvoří potenciálovou bariéru separující nosiče. Pokud je tato vrstva typu N, jsou do této vrstvy urychlovány elektrony a odváděny na elektrodu, která se nabíjí záporně, pokud by tato vrstva byla typu P, byly by do ní odváděny díry a nabíjela by se kladně. Na druhé straně absorbující vrstvy je realizován kontakt (případně s pomocí další vrstvy).

Na straně dopadajícího záření musí na povrch dopadat co nejvíce záření, elektroda musí mít tvar mřížky, nebo být pro dopadající záření transparentní. Z hlediska konstrukce článku je velmi důležitý výběr absorbujícího materiálu. Jedním z kritérií je maximální dosažitelná účinnost článku, která závisí na šířce zakázaného pásu absorbujícího materiálu. Teoretická maximální účinnost ideálního článku ($R_s = 0$, pouze zářivá rekombinace), který je realizován jako jednopřechodový v závislosti na mezeře pásma vzhledem k slunečnímu spektru AM 1,5 [20], [21] je uvedena na Obr. 13. Z toho je možné vyhodnotit vhodnost různých polovodičových materiálů pro výrobu fotovoltaických článků.



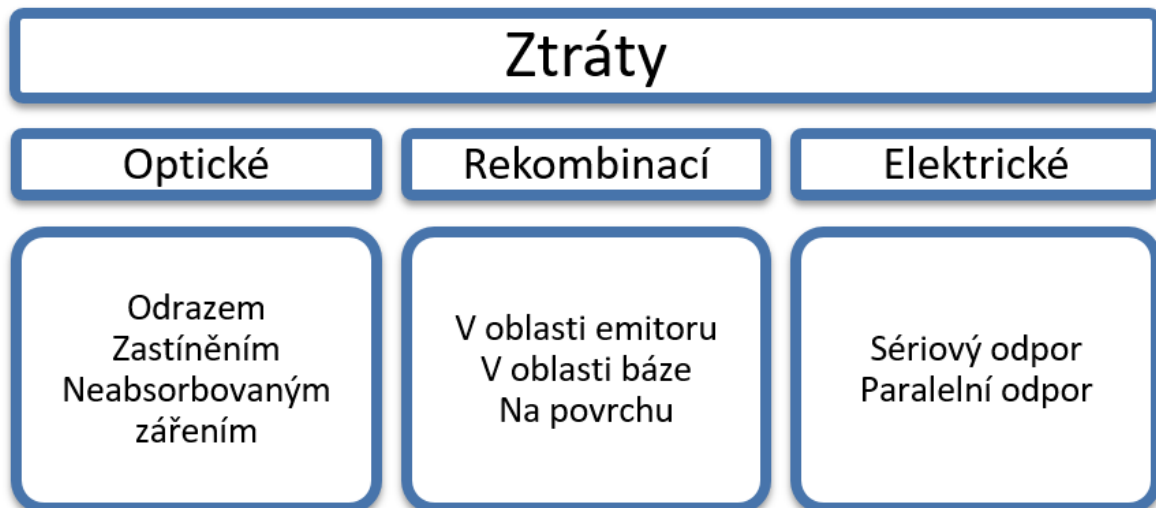
Obr. 13 Teoretická maximální účinnost článků různých materiálů [3]

Jedním z možných způsobů překonání Quasier – Shockleyho limitu účinnosti FV článků je použití takzvaných tandemových článků. Využívá se vrstvení materiálů s různou šířkou zakázaného pásu, kdy článek s užším zakázaným pásem (W_{g1}) je překryt článkem s širším zakázaným pásem ($W_{g2} < W_{g1}$) [3]. Část spektra s kratší vlnovou délkou je absorbována vrchním článkem, zatímco neabsorbované světlo proniká hlouběji do druhého článku, kde je absorbováno. Přidání dalších vrstev může vést k dalšímu zvýšení konečné účinnosti víceřechodového článku [21], [22], jak ukazuje Tabulka 2. Pro nekonečný počet vrstev je maximální účinnost 68 %.

Počet vrstev absorbéru	Účinnost (%)	Šířka zakázaného pásu (eV)
1	33	1,36
2	45	1,63; 0,74
3	51	2,02; 1,21; 0,59
4	55	2,31; 1,55; 0,99; 0,5

Tabulka 2: Limit účinnosti vícepřechodových článků

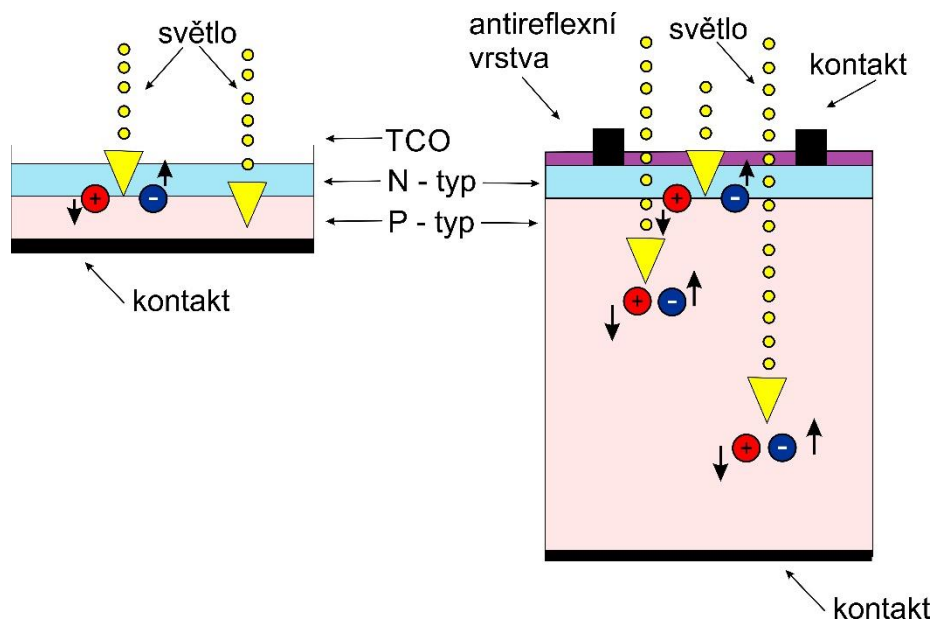
Dalším velmi důležitým faktorem je závislost absorpčního koeficientu na energii fotonu, která souvisí se strukturou energetických pásů absorbujícího materiálu. Pokud má materiál tzv. přímou pásovou strukturu, pro $\frac{hc}{\lambda} \geq W_g$ absorpční koeficient velmi rychle roste s energií fotonů a část spektra s $\frac{hc}{\lambda} \geq W_g$ je absorbována v tenké vrstvě ($\leq 3 \mu\text{m}$) pod povrchem, článek je možno realizovat ve formě tenké vrstvy deponované na vhodný substrát. V případě materiálu s tzv. nepřímou pásovou strukturou, např. krystalický křemík, absorpční koeficient pro $\frac{hc}{\lambda} \geq W_g$ s energií fotonů rovněž roste, ale je řádově nižší, než u materiálů s přímou pásovou strukturou, a tak pro absorpci části spektra s energií fotonů $\frac{hc}{\lambda} \geq W_g$ je třeba podstatně větší tloušťka absorbujícího materiálu ($\geq 100 \mu\text{m}$). Takto tlustou absorbující vrstvou je možno realizovat ve formě destičky absorbujícího materiálu [4]. Ve struktuře však může docházet ke ztrátám, jak je schematicky znázorněno na Obr. 14. K dosažení vysoké účinnosti fotovoltaických článků by měla být konstrukce a výrobní technologie připravena tak, aby se minimalizovaly všechny druhy ztrát v konstrukci.



Obr. 14 Rozdělení ztrát ve fotovoltaickém článku

Konstrukce a technologie článků by měly splňovat výše uvedená kritéria. Vzhledem k různé formě výchozího materiálu se konstrukce a technologie článků realizovaných z materiálů ve formě destičky značně liší od článků tenkovrstvých. V současné době jsou nejvíce využívány

články z krystalického křemíku, v menší míře tenkovrstvé články (články z amorfního křemíku, články na bázi CdTe a články na bázi $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$). Používané technologie respektují specifika jednotlivých materiálů. Rozdíl v konstrukci článků s různými typy struktury pásu je schematicky znázorněno na Obr. 15.



Obr. 15 Struktura FV článků z přímého polovodiče (tenkovrstvý) a nepřímý polovodič (na bázi destiček). - převzato z [23]

5.1 Dělení fotovoltaických článků

V současné době je většina fotovoltaických článků vyráběna z krystalického křemíku. Je to dáno zejména díky dobře zaběhnutým a známým technologiím výroby, které jsou komerčně dostupné. Nicméně během rozvoje fotovoltaiky byly patrné mnohé snahy o zlevnění výroby a byly postupně vyvíjeny nové materiály i technologie, zejména pak tenkovrstvé, které umožňují výrobu vícepřechodových článků.

5.1.1 Články z krystalického křemíku

Podle technologie výroby je možné je rozdělit do dvou skupin:

- monokrystalické,
- multikrystalické (též polykrystalické)

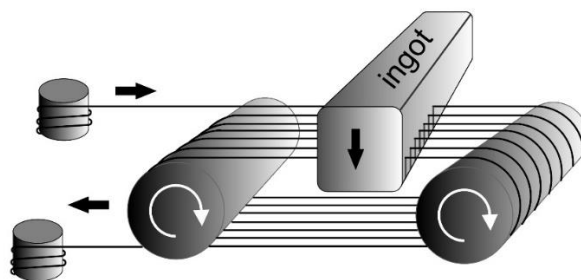
5.1.2 Monokrystalické FV články

V dnešní době se jedná prakticky o nejčastější typ článků, s klesající cenou monokrystalického křemíku, připravovaného Czochralského metodou, multikrystalický křemík přestává být ekonomicky výhodný. Články mají obvykle rozměr 156 mm x 156 mm, nicméně

zdokonalování technologie tažení monokrystalů, zejména hromadné zavedení technologie kontinuálního tažení, snižuje cenu technologie a umožňuje zavádět do výroby stále větší rozměry destiček; v současné době je maximálním rozměrem 210×210 mm.

5.1.2.1 Proces výroby destiček

Velikost křemíkového ingotu určuje konečnou velikost FV článku. V současné době je standardní velikost 156×156 mm². Pro řezání ingotu se obvykle používá technika řezání drátovou pilou [15]. Princip technologie řezání drátovou pilou je znázorněn na Obr. 16

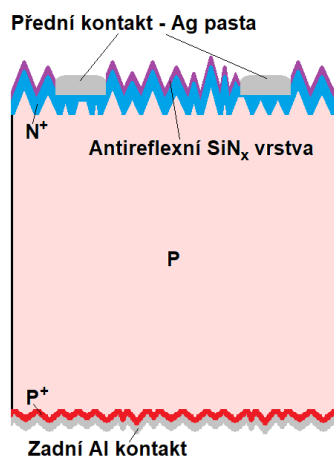


Obr. 16 Princip řezání křemíkového ingotu.

Standardní drátová pila vyrobená z ocelového drátu je navinuta kolem dvou nebo čtyř vodičích rolen tak, aby bylo vytvořeno přibližně 500 – 700 rovnoběžných řezů. Drát se obvykle přemotává z jedné cívky na druhou při současném řízení napjatosti. Délka drátu bývá kolem 400–800 km, v závislosti na jeho průměru. Průměr drátu je obvykle mezi 100 a 160 μm nicméně je snaha průměr snižovat, za účelem snížení odpadu při prořezu. Drátová pila je jinak statická a s postupujícím prořezem se pohybuje řezaný ingot.

Odběr materiálu při řezu není způsoben samotným drátem, ale abrazivní suspenzí, která je přiváděna přes drát. Alternativou je použití diamantového drátu [24] v kombinaci s chladicí kapalinou. Tato varianta umožňuje přibližně třikrát vyšší řeznou rychlost ve srovnání s řezáním na bázi abrazivní kapaliny. Diamantového řezacího drátu se používá převážně pro řezání monokrystalických ingotů [4]. Ztráta řezu představuje přibližně 40 % materiálu c-Si.

Výroba fotovoltaických článků je v současné době založena na velmi standardizovaném procesu [4]. Více než 80 % výroby FV modulů je postaveno na c-Si destičkách (wafer base) typu P. PN přechod je vytvořen po celé přední ploše difúzí fosforu. Zadní plocha vznikajícího článku je opatřena celoplošným metalickým kontaktem a P P⁺ vrstvou. Konstrukce tohoto typu článku je na Obr. 17.



Obr. 17 BSF struktura

Na rozhraní P a P⁺ se vytváří elektrické pole, které vytváří bariéru pro minoritní nosiče, což má za následek dosažení vyšší koncentrace minoritních nosičů náboje v objemu článku a snížení povrchové rekombinace u zadního kontaktu. Tento typ struktur je známý jako technologie BSF (back surface field) [4].

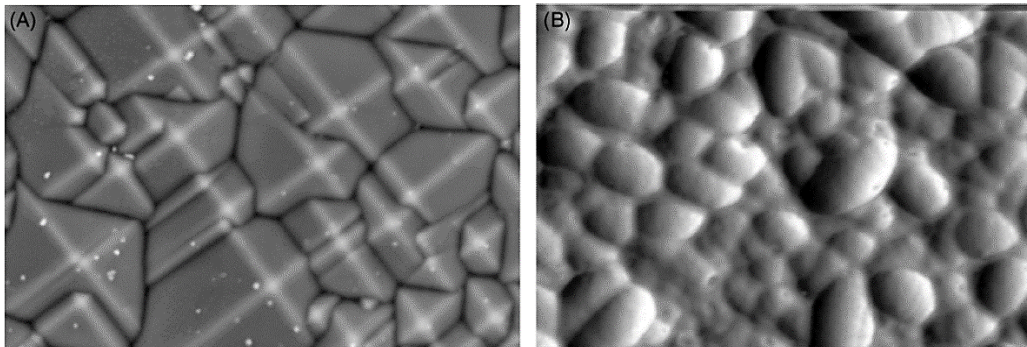
Na přední straně je odrazivost povrchu snížena kombinací povrchového texturování a antireflexního povlaku. N⁺ P přechod je umístěn přibližně 0,4 μm pod povrchem.

Konvenční křemíkové fotovoltaické články jsou na přední straně pokoveny pomocí kontaktních proužků, tzv. (kontaktních prstů), které shromažďují proud generovaný na N⁺P přechodu, a který protéká laterálně přes vrstvu emitoru N ke kontaktu.

Kolmo k tzv. kontaktním prstům jsou připojeny sběrnice, tzv. busbary, které již umožňují spojení jednotlivých článků do modulu. Důležitým faktorem při výrobě konvenčních fotovoltaických článků, je nalezení optimální rovnováhy mezi snahou o co nejhustější pokrytí sběrnicemi z důvodu minimalizace sériového odporu a eliminace negativních dopadů případných prasklin článku a ztrátami, které tyto sběrnice představují z hlediska zastínění.

V současné době je nejběžnější plocha článku 156×156 mm² s obvykle již pěti busbary nicméně existuje trend zvyšovat počet užších přípojníc na 8 nebo dokonce více [25]. Proces výroby monokrystalického i multikrystalického článku je téměř stejný. V současné době je obvyklá tloušťka destiček do 180 μm. Destičky vzniklé řezáním ingotu je nutné nejdříve leptat v izotropním chemickém leštícím roztoku (např. HNO₃: HF: CH₃COOH v poměru 5: 1: 1) aby se odstranily povrchové vrstvy (přibližně 10 μm) poškozené během procesu řezání a následně se provádí omytí deionizovanou vodou. Po odstranění poškozené vrstvy, je potřeba vytvořit na povrchu destičky texturaci, která snižuje odrazivost. K tomuto kroku se v případě

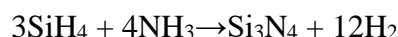
monokrystalických křemíkových destiček používají alkalické (NaOH nebo KOH) anizotropní lázně, které zajišťují spontánní vytvoření pyramidové struktury na povrchu, jak je znázorněno na Obr. 18 A [4].



Obr. 18 Povrchová struktura. (A) Alkalické anizotropické leptání (1; 0; 0) orientované monokrystalické destičky Si. (B) Kyselé anizotropické leptání multikrystalické křemíkové destičky [4]

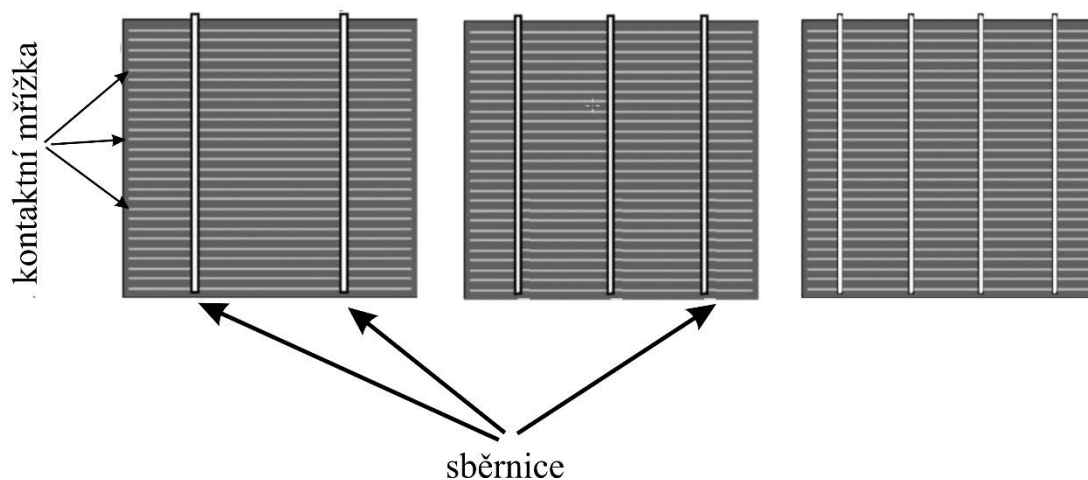
V případě multikrystalických destiček se povrchová struktura vytváří leptáním ve směsi HF, HNO₃, H₂O₂. Příklad strukturovaného povrchu je znázorněn na Obr. 18B. Po texturování se povrch očistí a provádí se vytvoření PN přechodu pomocí difúze fosforu, do hloubky přibližně 0,4 μm. Difúze se provádí při teplotě 820 C – 900 C s využitím PClO₃ ve formě plynu v difúzní peci nebo v kontinuální žíhací peci pomocí dopované pasty na jedné straně destičky. Nižší difúzní teploty jsou potřebné pro multikrystalický výchozí materiál z důvodu zhoršení parametrů materiálu při teplotě zpracování vyšší než 900 °C [4]. Pomalé ochlazování po procesu difúze pomáhá snižovat koncentrace rekombinačních center. Po difúzi zůstává na povrchu fosfosilikátové sklo, které se odstraní zředěným roztokem HF.

Následuje nanesení dielektrické vrstvy, která slouží jednak jako antireflexní vrstva a může sloužit rovněž k pasivaci povrchu. Na povrchu typu P je vhodné použití záporně nabitého dielektrika (např. Al₂O₃) v případě povrchu typu N pozitivně nabitě dielektrikum (SiO₂ nebo Si₃N₄), protože vytváří akumulární vrstvu pod povrchem křemíku a snižují rychlost povrchové rekombinace. Účinná pasivace povrchu typu N v kombinaci s výrobou antireflexní vrstvy může být provedena nanesením vrstvy nitridu křemíku ze směsi silanu a amoniaku, pomocí plasmatické depozice:



Tento krok je velmi důležitý zejména pro multikrystalické články, protože atomární vodík z plazmy interaguje s nečistotami a defekty na hranicích zrn, které tak pasivuje. V tomto výrobním kroku se také vytvoří amorfni film nitridu křemíku s až 40 atomovými procenty vodíku (tzv. vrstvy SiNx). Složení vrstvy ovlivňuje index lomu a může být řízeno během procesu výroby vrstvy. Tloušťka vrstvy je přibližně 75 nm [4]. Následuje vytvoření předních

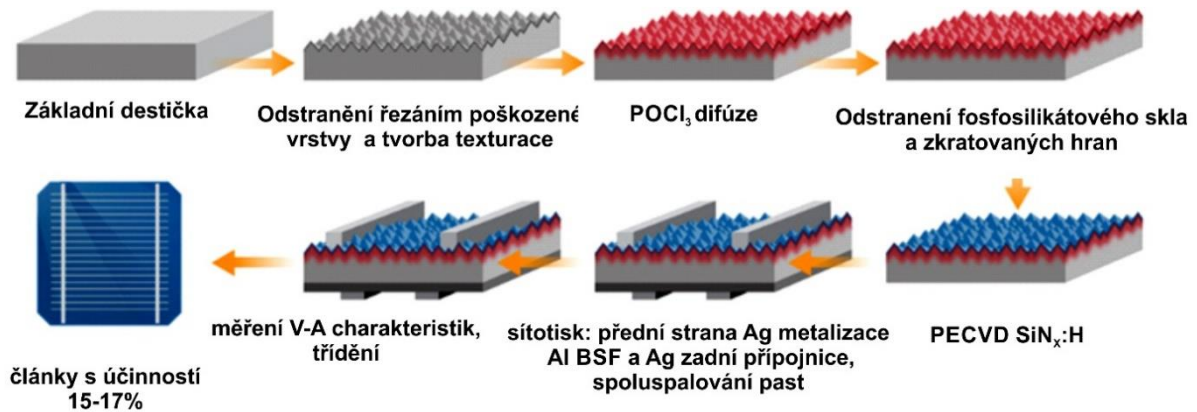
kontaktů. Nejčastěji se používá kontaktní mřížka ve tvaru znázorněném na Obr. 19, sestávající z tenkých kontaktů, sbírajících proud generovaný v přilehlé oblasti, připojených k silnějším sběrnicím, určeným k připojování vývodů.



Obr. 19 Způsob kontaktování článků

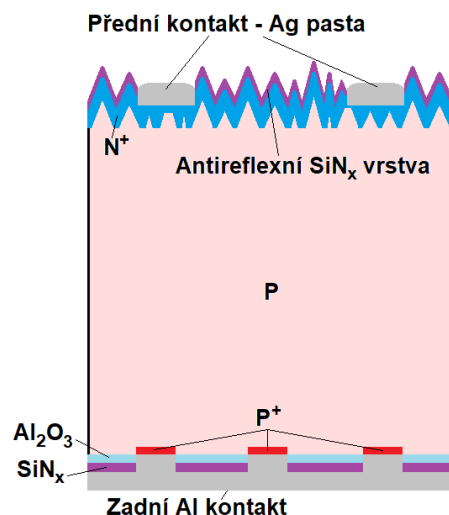
Kontaktní mřížka na přední ploše by měla vytvářet velmi úzké, ale silné a vysoce vodivé kovové linie s nízkým kontaktním odporem vůči Si. To se většinou provádí sítotiskem fosforem dotované stříbrné pasty na vrstvu typu N pokrytou vrstvou nitridu křemíku. Použitá pasta se skládá z 60% - 80% vodivého materiálu (prášek částic stříbra přibližně 0,1 μm), 5% - 10% skleněné frity (prášek různých oxidů olova, bizmutu, křemíku atd.) Z organického rozpouštědla a organického pojiva, které váže aktivní prášek před tepelnou aktivací. Současným trendem je snížení spotřeby stříbra snížením šířky kontaktních sběrnic (tzv. fingers) na úroveň 50 – 10 μm a snížením obsahu stříbra v busbarech. Na zadní povrch je nanášena pomocí sítotisku vrstva pasty obsahující hliník. Tato pasta obsahuje buď ještě stříbro umožňující pájení kovových kontaktů během sestavení modulu, nebo se proužky stříbrné pasty tisknou ve druhém kroku na pastu obsahující Al. Po každém potisku je nutné křemíkové destičky osušit při teplotě přibližně 200 °C. Aby se dosáhlo dobrého elektrického kontaktu s podložním polovodičem, jsou vrstvy pasty finálně vypalovány, při teplotě mírně nad 800 °C. Na předním povrchu se vrstva nitridu rozpustí ve fritě pasty a stříbro vytvoří na povrchu N⁺ ohmický kontakt. Na zadním povrchu se vytvoří tavenina Al-Si a během chlazení naroste rekrystalizovaná vrstva P⁺ dotovaná Al, která vytváří na zadním povrchu dobrý ohmický kontakt. Složení pasty a tepelný profil musí být upraveny velmi pečlivě. Po zhotovení kontaktu je ještě nezbytné odstranit zkratky vzniklé na hranách destiček během technologického procesu, protože vytváří zkrat přes celou strukturu. Provádí se to většinou laserovou ablací hran [4]. Alternativou může být leptání okrajů destiček plazmou ihned po difúzi fosforu. Posledním krokem je měření V-A charakteristiky článku

pomocí solárního simulátoru a třídění článků do skupin podle jejich výkonu. Průběh procesu je znázorněn na Obr. 20



Obr. 20 Proces výroby BFS [26]

Jeden ze způsobů, jak zvýšit účinnost článku, je snížit povrchovou rekombinaci v zadní části článku. Pasivace emitoru a zadního kontaktu snižuje rekombinaci v blízkosti zadního kontaktu. Na křemík typu P a metalický kontakt (Al) se umístí dielektrická vrstva (SiO_2 nebo Al_2O_3 která podstatně snižuje povrchovou rekombinaci), v této vrstvě se vytvoří síť malých otvorů. Následně se nanese na přední stranu článku sítotiskem kontaktní struktura pastou obsahující stříbro a na zadní stranu pasta obsahující Al. Po zažhnutí se pak na zadní vytvoří kontakty P^+P v otvorech v dielektrické pasivační vrstvě, čímž se podstatně sníží rekombinace na zadním kontaktu. Takto modifikovaná struktura se nazývá PERC a je znázorněna na Obr. 21.



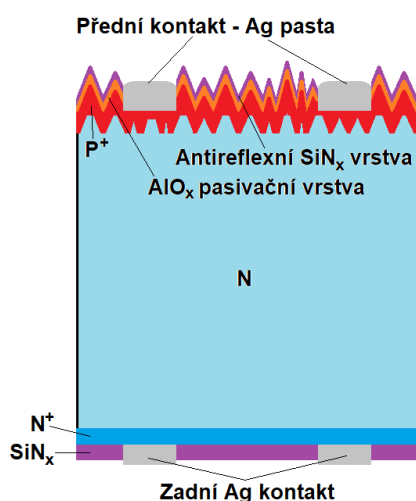
Obr. 21 PERC struktura

Proces výroby článků PERC je následující. Po povrchovém texturování a difúzi fosforu je zadní strana desky vyleštěna a následně je odstraněno fosfor-silikátové sklo a provedena izolace

hran [4]. Tenká vrstva Al_2O_3 se nanáší na zadní povrch typu P obvykle pomocí PECVD. Dále je nanášena na oba povrchy článku antireflexní SiN_x vrstva také metodou PECVD. Následně je pomocí laseru na několika místech odstraněna dielektrická vrstva až na polovodič. Po laserové ablaci se provede tvorba kontaktů na obou stranách článku. Posledním krokem se vytvoří kontakt emitoru a lokální kontakty BSF na zadní straně.

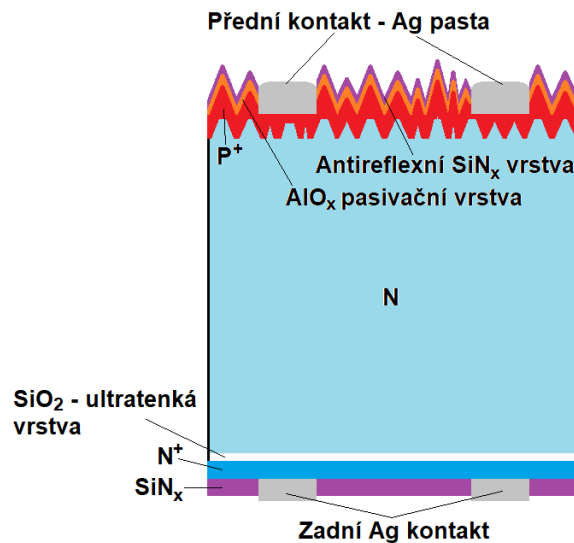
Články mohou být vyrobeny jak z mono c-Si, tak z mc-Si. Ve srovnání se standardní technologií BSF je zapotřebí pouze další tři výrobní kroky. Takováto struktura má výslednou účinnost vyšší než BSF (až 22%).

Články PERT (passivated emitter rear totally diffused) se základním polovodičem typu N jsou z pohledu konstrukce podobné článkům PERC vyrobeným z křemíku typu P. Struktura je znázorněna na Obr. 22.



Obr. 22 PERT struktura

Po povrchovém texturování a difúzi boru je zadní část destičky vyleštěna a difúzí fosforu je na zadní straně článku vytvořena silně dotovaná N^+ vrstva. Přední povrch dotovaný bórem potřebuje jako účinnou pasivaci tenkou vrstvu SiO_2 nebo Al_2O_3 , kterou lze překrýt vrstvou SiN_x a vytvořit tak antireflexní vrstvu [4]. Vrstva N^+ na zadní straně také potřebují pasivaci, která se provádí vrstvou SiN_x . Po povrchové pasivaci je nutné laserem vytvořit lokální odstranění zadní dielektrické vrstvy. Po laserové ablaci se vytvoří kovové kontakty na obou stranách struktury. Články PERT z monokrystalického křemíku typu N mohou dosáhnout účinnosti přes 22 % [27]. Další vysoce efektivní strukturou FV článků na výchozím materiálu typu N je takzvaná struktura TOPCon (tunnel oxide passivated contact) [28], jak je znázorněno na Obr. 23. Ve srovnání s dalšími potenciálními novými technologiemi, jako jsou HJT a IBC, lze TOPCON vytvářet z aktuální řady PERC nebo PERT.



Obr. 23 TOPCon struktura

Přední strana článku je vyrobena stejným způsobem jako u technologie PERT. Na zadní straně článku je vytvořena pasivační vrstva SiO_x o tloušťce jednoho nebo dvou nanometrů což umožňuje nosičům náboje procházet skrz tunelovým jevem přes tuto tenkou dielektrickou vrstvu.. Poté se na celou vrstvu ultratenkého oxidu nanese tenká vrstva N^+ materiálu a následně se vytvoří zadní metalický kontakt. Takto vyrobená struktura může dosahovat účinnosti až 25,1 % [4].

5.1.3 Tenkovrstvé články

Z důvodu úspory materiálu (a tím i nákladů) byly vyvinuty tenkovrstvé FV články. Tyto články mají proti klasickým krystalickým článkům sice nižší konverzní účinnost, ale ta byla vyvážena nižší cenou (výroba je materiálově méně náročná, nicméně vyžaduje relativně drahá technologická zařízení) a také lepšími vlastnostmi při nízkých úrovních ozáření. Díky svým vlastnostem mohou tenkovrstvé moduly (TF) dosahovat vyšších ročních výnosů proti krystalickým modulům, zejména při difúzním ozařování. Další výhodou je možnost nanášení na více druhů substrátů, což umožňuje výrobu např. flexibilních FV modulů a v neposlední řadě jednodušší výrobní technologie bez nutnosti pájení, které využívají pro sběr proudu elektrody na bázi transparentních vodivých oxidů (TCO). Na druhou stranu jejich prostorová náročnost jednoznačně způsobuje vyšší nároky na BOS (Balance of System komponenty), takže díky současné nízké ceně c-Si článků může být cena celého TF fotovoltaického systému vyšší. Pro výrobu TF modulů se využívají zejména dvě metody nanášení:

- Vakuová depozice
- Chemical vapour deposition (CVD) – chemická depozice z plynné fáze

Mezi nejběžnější materiály patří:

- amorfni křemík (a-Si), v roce 1992 30 % celkové produkce, v současné době méně než 1 % celkové produkce
- mikrokrystalický křemík, v současné době jen v tandemu s a:Si
- telurid kademnatý (CdTe) a sulfid kadmia (CdS), v současné době až 4 % produkce
- CIS nebo CIGS což je sloučenina čtyř prvků: měď, indium, galium a selen, v současné době pod 2 % celkové produkce

5.1.3.1 Amorfni křemík

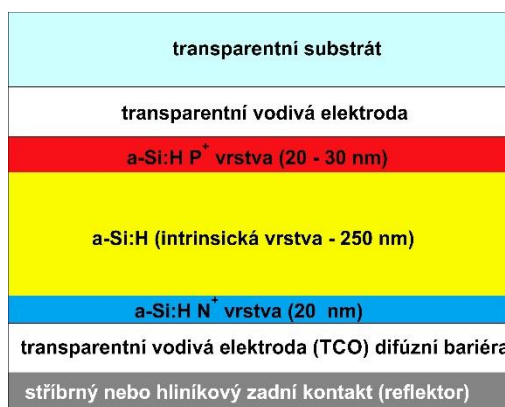
Amorfni křemík je možné nazvat křemíkem v „neuspořádané formě“, neboť jeho struktura není periodická v celém objemu krystalu. Ovšem na krátké vzdálenosti, několik atomů, je periodicitata patrná. Důsledkem neperiodicity jsou nenasycené vazby křemíku, tzv. koordinační defekty. Tyto poruchy jsou rozloženy ve vzorku homogenně. Nenasycené vazby a-Si jsou nežádoucí (tvoří lokální rekombinační centra), proto se vzorky pasivují vodíkem a získává se tak a-Si:H (hydrogenizovaný amorfni křemík), obvykle označovaný jako amorfni křemík. Takto se sníží hustota hlubokých stavů a vzorek je vhodný pro optoelektrické použití.

Hydrogenizovaný amorfni křemík má asi 10x vyšší absorpční koeficient α v oblasti infračervené části slunečního záření oproti krystalickému křemíku. Jeho absorpční hrana je právě na rozhraní infračervené a červené oblasti z čehož plyne, že většinu infračerveného světla propouští. Hydrogenizovaný amorfni křemík vzniká při samotné přípravě amorfniho křemíku, a to rozkladem silanu SiH_4 v doutnavém výboji v atmosféře směsi H_2 a SiH_4 při teplotě substrátu nižší, než 300°C . Z technologického hlediska je významná velká flexibilita takto vzniklého materiálu, co do struktury složení a možnosti dopování. Změnou parametrů přípravy lze přejít od látky s amorfni strukturou k látce polykrystalické, taktéž změnou složení směsi plynů a depoziční teploty lze měnit složení křemíku a tím i šířky zakázaného pásu. Přidáním doplňujících plynů lze, v kontinuálním procesu, vytvářet P-N přechody, P-i-N přechody a dokonce i $\text{P}^+ - \text{N}^+$ tunelové přechody.

Absence mřížkového uspořádání atomů u amorfniích látek vede k „rozmazání“ jasných hranic valenčního a vodivostního pásu. U amorfniích látek, které představují nejvyšší stupeň neuspořádanosti, zanikne periodičnost uspořádání a tím ztrácí i pásový model, odvozený pro periodické uspořádání, svůj praktický význam.

U amorfního křemíku, který se získá rozkladem silanu (SiH_4) doutnavým výbojem ve zředěné vodíkové atmosféře, váže vodík neúplné vazby a významně sníží hustotu stavů v zakázaném pásu. Hydrogenizovaný amorfni křemík a-Si:H lze dopovat přidáním B_2H_6 nebo PH_3 do atmosféry při tvorbě vrstev a stává se tak důležitým a levným tenkovrstvým polovodičem.

Nosiče náboje ve vysoce kvalitním krystalickém křemíku mají velké difúzní délky, větší než 100 μm . Standardní konstrukce takové součástky může tedy být klasická PN struktura, kde dochází k transportu nosičů náboje hlavně difúzí a pouze malou částí k pohybu přispívá drift. U materiálů jako je amorfni hydrogenizovaný křemík (a-Si:H) a mikrokrystalický hydrogenizovaný křemík $\mu\text{c-Si:H}$ je situace složitější. Oba materiály obsahují spoustu defektů, a tím pádem dochází ke snížení difúzní délky nosičů náboje, a to řádově na jednotky μm . Hlavním typem pohybu v těchto materiálech je právě drift, tedy pohyb nosičů způsobený elektrickým polem. Z tohoto důvodu mají současně vyráběné fotovoltaické články z amorfniho křemíku následující, poměrně komplikovanou P-i-N strukturu, která je schematicky zobrazena na Obr. 24. Dále mají nosiče náboje také velmi malou pohyblivost ve srovnání s krystalickým křemíkem, s čímž souvisí i vysoká rezistivita materiálu. Proto musejí být vrstvy relativně tenké (submikronové), aby sériový odpor byl přijatelný. Dostatečně dlouhou dráhu paprsku (aby byla delší, než absorpční délka) zajišťuje texturace TCO – „light trapping effect“.



Obr. 24 Struktura solárního článku z amorfniho křemíku

Intrinziční vrstva vložená mezi silně dotované polovodiče umožňuje vytvoření elektrického pole a snižuje hustotu defektů. Technologie depozice vrstev pomocí PECVD umožňuje vytvářet změnou složení směsi plynů vrstvu mikrokrystalického křemíku na vrstvě amorfniho křemíku. Vzniká tak tandemová struktura amorfniho a mikrokrystalického článku (tzv. Micromorf), která umožňuje lepší využití slunečního spektra.

Základní technologie výroby tenkovrstvého křemíku

Pro výrobu tenkovrstvých křemíkových článků se většinou používá metoda CVD. Nejdůležitějším procesem je příprava křemíku rozkladem silanu na zahřátém substrátu $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$. Výsledná struktura nanesené vrstvy křemíku závisí na podmínkách nanášení, zejména na obsahu silanu ve směsi plynů a také na teplotě substrátu. Amorfni struktura se tvoří při teplotách substrátu v rozmezí 100 °C - 300 °C a vysoké koncentraci silanu v nosném plynu (vodík).

Druhým velmi důležitým parametrem pro růst vrstvy je tzv. ředicí poměr

$$r_H = ([\text{H}_2] + [\text{SiH}_4]) / [\text{SiH}_4].$$

Pokud je hodnota $r_H < 30$, vznikající vrstva křemíku má amorfni strukturu. Krystalické vrstvy se tvoří, v případě, že hodnota ředicího poměru je $r_H > 45$ [29]. Změna složení plyné směsi v reakční komoře umožňuje vytváření vícevrstevných tenkovrstvých struktur v jednom zařízení (např. amorfni a mikrokrystalický Si, amorfni a polykrystalický Si, amorfni Si: H a amorfni SiGe: H atd.).

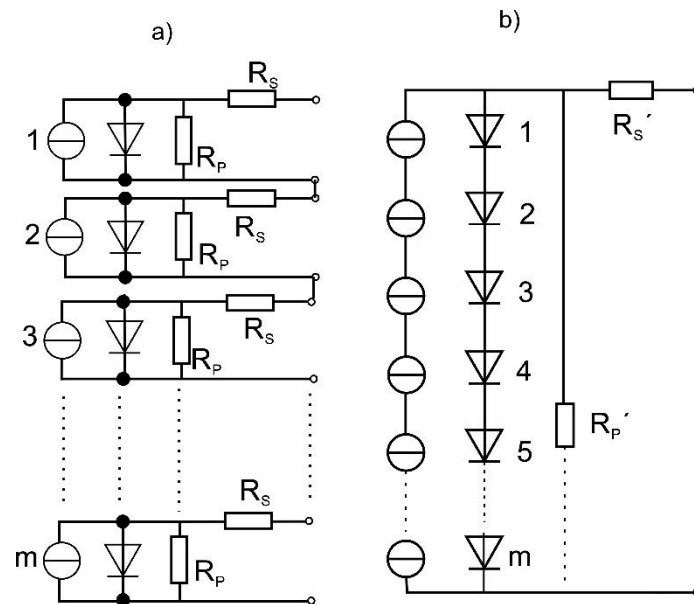
6 Fotovoltaické moduly

Z důvodu, že jednotlivé fotovoltaické články mají pracovní napětí menší než 1,5 V (v případě krystalického křemíku okolo 0,5 V) a proudovou hustotu několik desítek mA/cm² (u krystalického Si ≈ 35 mA/cm²), což není vhodné pro praktické použití, je nutné fotovoltaické články sériově pospojovat do větších řetězců, které již mají vhodnější výstupní parametry. Kromě toho je třeba články ochránit proti mechanickému poškození a vlivu okolního prostředí.

Příklad sériového spojení článků je znázorněn na Obr. 25a). Pro sériové spojení je nezbytné, aby všechny články měly pokud možno stejný proud I_{MP} . Ve zjednodušeném přiblížení, znázorněném na Obr. 25b) může být modul charakterizován jedinou hodnotou sériového odporu R'_S a paralelního odporu R'_P . Voltampérová charakteristika modulu (m do série zapojených článků) má tvar analogický ke vztahu (6.1) [30]:

$$I = I_{PV} - I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(U + R'_S I)}{m \cdot \beta_1 kT} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(U + R'_S I)}{m \cdot \beta_2 kT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + R'_S I}{R_P} \quad (6.1)$$

U modulu je pak možno stanovit parametry U_{OC} , I_{SC} , I_{MP} , U_{MP} , P_{MAX} , FF a účinnost η jako u FV článků. Tyto parametry se udávají za standardních testovacích podmínek.

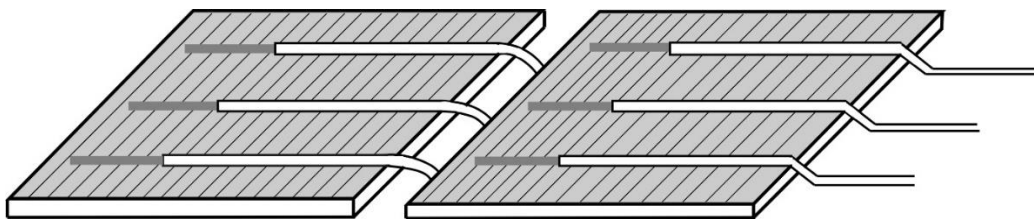


Obr. 25 a) Náhradní schéma sériově spojených článků v modulu, b) Zjednodušené náhradní schéma sériové spojení m článků

Takto spojené články je třeba uspořádat tak, aby byla maximálně využita plocha a zapouzdřit tak, aby články byly ozařovány s minimálními optickými ztrátami a ochráněny jak proti mechanickému poškození, tak nepříznivým účinkům vnějšího prostředí. Výsledný produkt je označován jako fotovoltaický modul. Konstrukce a technologie modulů závisí na typu fotovoltaických článků.

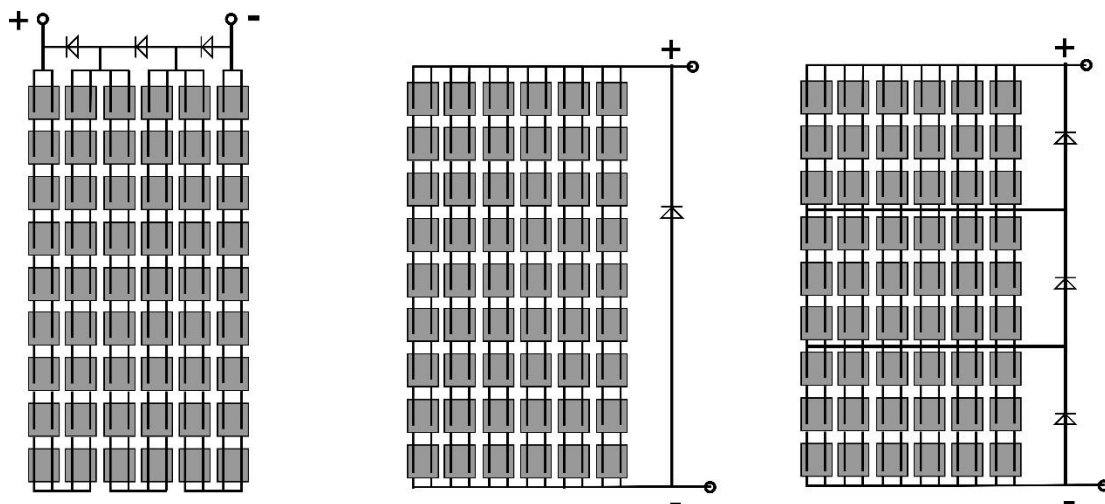
6.1 Moduly z článků z krystalického křemíku

Velmi důležité je využití plochy; proto se používají články čtvercového (obdélníkového) tvaru. Prvním krokem k vytvoření modulu je propojení FV článků do řetězců. K tomu se používá více postupů. Nejběžnější z nich je pájení. Každý článek je vybaven přípojnými (busbary), které slouží jak k odběru proudu, tak k propojení článků. Pro připojení se používají měděné pásky. Tyto pásky jsou připájeny k přípojným FV článků pomocí pájky (zatím se používá cín-olověná pájka a to z důvodu nižší teploty tání a tudíž nižšího mechanického napětí, vznikajícího pájením). Propojovací měděné pásky musí překrývat velkou část přípojnice, protože vodivost přípojníc z vypalovaných vodivých past je relativně nízká. Nejběžnější propojení standardních krystalických článků je znázorněno na Obr. 26.



Obr. 26 Pájené spojení jednotlivých článků

Pro realizaci modulu jsou vybírány články s malým rozptylem I_{mp} . Jednotlivé články jsou pospojovány do řetězců a ty jsou následně vodivě spojeny tak, aby vytvořily matici článků, která obvykle obsahuje několik jednotlivých řetězců spojených v sérii, případně paralelně, nebo sério-paralelně, jak je znázorněno na Obr. 27



Obr. 27 Výsledná matrice článků.

Samotné pospojování jednotlivých článků však není modulem. Takto spojené články je třeba ještě zapouzdřit do řady vysoce transparentních izolačních materiálů a tak chránit články před negativními účinky vlhkosti a vzniku zkratů nebo elektrochemické koroze kontaktů.

Pronikání vlhkosti (případně jiných látek) krycí vrstvou způsobuje řadu degradačních procesů. Jako krycí transparentní materiál, poskytující rovněž mechanickou ochranu, se používá tvrzené sodnovápenaté sklo s velmi nízkým obsahem železa. Prostor mezi sklem a FV články je třeba vyplnit transparentním materiálem o vhodném indexu lomu (nejlépe stejný index lomu jako sklo), aby nedocházelo k optickým ztrátám na rozhraní materiálů. Zároveň tento materiál musí být v rozsahu pracovních teplot elastický (elastomer), aby vyrovnával mechanické namáhání, vyvolané různou teplotní roztažností skla a křemíku. Rozsah pracovních teplot je omezen zdola teplotou skelného přechodu, shora teplotou měknutí.

Proces výroby: na čisté sklo se položí fólie laminovacího materiálu, na který se položí řetězce do série spojených článků. Poté se provede spojení těchto řetězců (nejčastěji do série). Na spojené řetězce článků se položí další fólie laminovacího materiálu a zadní krycí fólie. Těmito fóliemi jsou na zadní stranu modulu protaženy vývody z matrice FV článků (včetně vývodů k překlenovacím diodám) do míst, kde bude realizována připojovací krabice (junction box). Takto realizované složení modulu se spojí v jeden nerozebíratelný celek laminací.

Proces laminace závisí na použitém materiálu. Nejčastěji používaným materiálem (více než 90 % současné produkce) je termoplast, ethylenvinyl-acetát (EVA). EVA je kopolymer, tj. směs ethylenu a vinylacetátu nemá přesné složení, poměr složek ovlivňuje vlastnosti. Hmotnostní podíl vinylacetátu se obvykle pohybuje od 10 do 40 %, přičemž zbytek tvoří ethylen. Vyrábí se jako extrudovaná fólie o tloušťce přibližně 0,5 mm [4]. Spolu s polymerem obsahuje materiál také činnidla a stabilizátory, jejichž úlohou je zlepšit výsledné vlastnosti zapouzdřující vrstvy [31]. Dalším krokem výroby je laminování [4], [22]. Při tomto procesu se celá sendvičová struktura vloží do laminátoru a zahřívá se na 110 až 120 °C. Při tomto procesu je modul zavřený v komoře s řízeným vakuem z důvodu minimalizace vzniku bublin. Při teplotě kolem 120 °C se EVA roztaví a obklopí FV články. Tento proces trvá 4 až 10 minut a poté se teplota zvýší na 140 °C - 150 °C, kdy při této teplotě činnidla indukují zesíťování řetězců molekul EVA, která poté získá vlastnosti podobné kaučuku. Tento proces trvá 10 až 60 minut, v závislosti na použitém činnidle.

EVA se používá hlavně při výrobě modulů se zadní krycí vrstvou tvořenou fólií. U modulů se strukturou sklo – články – sklo je třeba použít jiné materiály, jako je polyvinylbutyral (PVB), který umožňuje využití standardních laminovacích procesů, nebo silikon, který má vynikající vlastnosti, ale kvůli vysoké ceně a potřebě speciálních zpracovatelských strojů a technik se používá jen zřídka [32]. Jako další možný materiál se jeví poměrně nový (termoplastický) polyolefin (TPO). Jedná se o nezesíťující materiál, který vykazuje značnou stálost a rovněž

umožňuje použití standardních laminačních procesů. Změna barvy TPO je přibližně devětkrát pomalejší než změna barvy EVA [33].

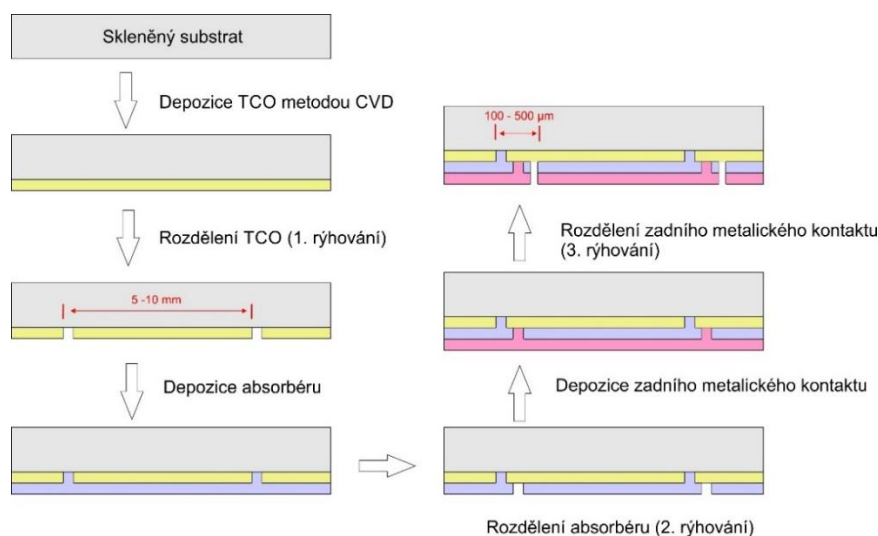
Použitý laminační materiál má významný vliv na proces degradace jako je třeba potenciálem indukovaná degradace, kdy vhodně zvolený laminační materiál zpomaluje pronikání sodných iontů z krycího skla hlouběji do struktury. V současné době je stále nejvíce využíván EVA, nicméně se vzrůstajícím podílem sklo-sklo modulů se začínají prosazovat i další materiály.

Po laminování se přebytečný materiál odstraní z okrajů, které jsou následně utěsněny silikonovou gumou. Zapouzdření musí ale také zabránit mechanickému poškození fotovoltaických článků.

Zadní krycí vrstva modulu je obvykle tvořena kompozitní plastovou fólií (tedlar). Případně je použito druhé sklo, které působí jako bariéra proti vlhkosti, která by mohla urychlit degradační reakce ve FV modulu. Použití skleněné tabule jako zadní krycí vrstvy snižuje rychlost degradace a zvyšuje životnost modulu (až na 40 let), na druhé straně použití skla zvyšuje hmotnost modulu, náklady a ovlivňuje odvod tepla od FV článků [34].

6.2 Tenkovrstvé moduly

Tenkovrstvé technologie se díky způsobu výroby (depoziční technologie) realizují pro reálné aplikace přímo ve formě modulů – články nejsou spojovány do modulů dodatečně, ale naopak jsou realizovány rozdělením deponované vrstvy na vhodně propojené proužky. Toho je možné docílit pomocí laseru nebo mechanickým drážkováním. Tento princip je znázorněn na Obr. 28.



Obr. 28: Postup výroby TF modulu

Sled technologických operací je následující:

Na očištěný skleněný podklad se nanese přední vodivá vrstva, jedná se o TCO vytvářený metodou CVD nebo naprašováním. Tento postup je typický pro moduly z a-Si a CdTe. V případě CIGS modulů se postupuje opačně a nejdříve je nanesen zadní metalický kontakt, obvykle molybden. Následně je potřeba provést první drážkování a vytvořit tak základ jednotlivých článků. Potom dohází k samotné depozici struktury článku (vrstva po vrstvě) a následuje druhé drážkování, kdy je nanesená vrstva rozdělena, ale spodní vrstva TCO zůstává nenarušena. Následuje nanesení zadního metalického kontaktu a třetí drážkování, které dokončí sériové propojení článků. V případě CIGS je poslední depozicí nanesen TCO, který slouží jako horní kontakt.

Dalším krokem je odstranění zkratovaných okrajů a připevnění výstupních kontaktů obvykle vodivým lepidlem. Modul je následně zapouzdřen pomocí EVA a druhého krycího skla [20]. Technologický postup vyžaduje homogenní velkoplošnou depozici, s čímž souvisejí velké nároky na technologická zařízení a velké investiční náklady. Jednotlivé články v TF modulu nelze třídít a vybírat do sériového zapojení články se stejným I_{MP} , což způsobuje, že tenkovrstvé fotovoltaické moduly pak mohou být poměrně značně nehomogenní a jejich účinnost je tím určitým způsobem ovlivněna.

Jedna z výhod tenkovrstvé technologie, je možnost nanášení jednotlivých vrstev na flexibilní podklad a tím vytvářet ohebné nebo tvarově složité moduly. Jako pružný substrát lze použít buď fólii z nerezové oceli, nebo některé plastové materiály. U využití plastových podkladů je limitující teplota skelného přechodu nebo deformace. U technologie využívající CIGS nelze teplotu depozice snížit pod 450 °C. Jako substrát tedy musí být použity pouze kovové fólie, popřípadě polyimidové podklady. Při výrobě amorfních křemíkových článků lze teplotu procesu snížit až na 150 °C, a je možné použití jako substrát levnější fóliové materiály (polyestersulfonát (PES), polyethylnaftalát (PEN) atd.) [35], [36]. Technologie výroby flexibilních modulů je podobná technologii popsané v předchozím odstavci, pouze laserové drážkování je nahrazeno mechanickým.

7 Popis defektů, jednotlivých poruch a selhání modulů

Celková garance výrobce na výrobek, tj. za patrné nežádoucí změny, které nebyly způsobeny chybnou manipulací nebo tzv. vyšší mocí – bývá několik let, do této kategorie garance je možné zahrnout garanci spojenou s mechanickými vlastnostmi a možnostmi namáhání modulu, jedná se zejména o akceptovatelnou tíhu sněhu nebo tlak větru. Doba této garance se u jednotlivých výrobců liší.

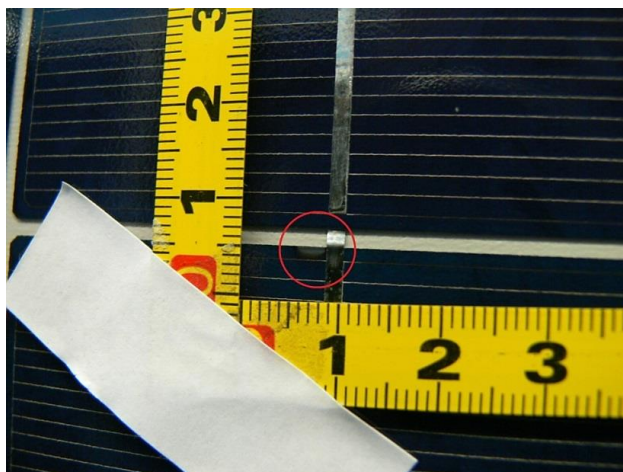
V reálném provozu dochází vlivem různého namáhání (záření, mechanické, tepelné, elektrické) také k postupnému snižování výkonu modulu a životnost modulů se obvykle stanovuje právě předepsanou rychlostí poklesu výkonu během provozu. Jedná se o dobu, za kterou vlivem degračních mechanismů nesmí výkon modulu klesnout obvykle pod 80 % štítkové hodnoty výkonu (měřeného za STC), přičemž v současné době je předpokládán lineární pokles výkonu. Tato garanční doba na výkon bývá obvykle 20 – 40 let. Pokud výkon modulu klesne pod 80 % štítkové hodnoty za dobu kratší, než je životnost stanovená výrobcem, můžeme to považovat za selhání modulu.

Selhání může nastat jednak skokovou změnou výkonu (porucha), po které přestává být modul funkční nebo postupnou změnou vlivem degradace rychlejší, než zaručuje výrobce, přičemž po snížení výkonu je modul stále ještě funkční, ale výkon je nižší, než stanovená mez.

Čistě estetický problém, který nezpůsobuje definovaný pokles, nelze považovat za selhání FV modulů. Problém, který byl způsoben nesprávným zacházením nebo vlivem nestandardních klimatických podmínek nelze také považovat za selhání modulu. Mezi takové případy může patřit např. znečištění modulu při instalaci v příliš prašné průmyslové zóně nebo selhání v důsledku zásahu blesku. Na druhé straně, poruchy v důsledku zatížení sněhem jsou považovány za selhání modulu, a to v případě, že modul měl podle označení výrobce takové zatížení bez problémů snést.

7.1 Definice estetických vad, které nelze považovat za selhání modulu.

Na mnoha modulech je možné pozorovat jisté druhy defektů, které vznikly přímo při výrobě. Tyto defekty samozřejmě mohou být také důvodem pro ztrátu výkonu nebo selhání, ale mnohem častěji se jedná spíše o nedokonalost výroby, se kterou již výrobce počítá. Tyto vady tedy nejsou relevantní z pohledu bezpečnosti nebo výkonu, protože údaje na štítku již zohledňují elektrické ztráty způsobené nedokonalou výrobou. Příklad zmiňované vady ukazuje Obr. 29. Jedná se o tmavé skvrny na okrajích jednotlivých článků. Tyto defekty pocházejí z manipulátorů s fotovoltaickými články a vznikají v průběhu nanášení antireflexní vrstvy, je tedy patrné že s tímto jevem je možné se setkat pouze u modulů využívající krystalický křemík.



Obr. 29 Estetické defekty, které nemají vliv na výkon modulu

Podobným defektem je například tmavnutí zadní fólie, které sice naznačuje, že v zadní fólii probíhají chemické procesy vlivem UV záření, nicméně k omezení funkčnosti modulů nedochází.

7.2 Pokles výkonu, který lze považovat za selhání modulu.

V případě, že změřený výkon modulu P_{MAX} rozšířený o celkovou nejistotu měření ΔP_{MAX} (předpokládá se měření v souladu s normou ČSN EN 60904-7) je nižší, než výkon uvedený na výrobním štítku modulu, včetně uvedené tolerance a započítání vlivu přirozeného stárnutí, je možné takový modul považovat za nevyhovující. Jedná se tedy o výkonové selhání modulu [37].

Pouze moduly vykazující nižší výkon než je výkon garantovaný výrobním štítkem, popřípadě výrobní dokumentací, bývají výrobci uznány jako vadné a jsou vyměněny. Pro doložení výkonové ztráty jsou vyžadovány zkoušky, které jsou schopny prokazatelně určit případnou výkonovou ztrátu. Jedním z prostředků je kromě měření výkonu překvapivě provedení vizuální kontroly, kdy např. při oddělení části článku s plochou převyšující 10 % plochy článku se jedná z hlediska standardu (ČSN EN 61215 a ČSN EN 61646) o významný vliv na výkon, který je důvodem pro reklamaci.

7.3 Degradční procesy ve fotovoltaických modulech

7.3.1 Degradční procesy působením světla

a) moduly z krystalického křemíku

Další typické defekty, které mohou vést k poklesu výkonu modulu, a přesto nejsou považovány za selhání PV modulu, jsou popsány níže. Jedná se především o pokles výkonu vlivem působení světla (Light Induced Degradation – LID) u krystalických křemíkových modulů, a to v důsledku vzniku bor-oxidových komplexů, které působí jako rekombinační

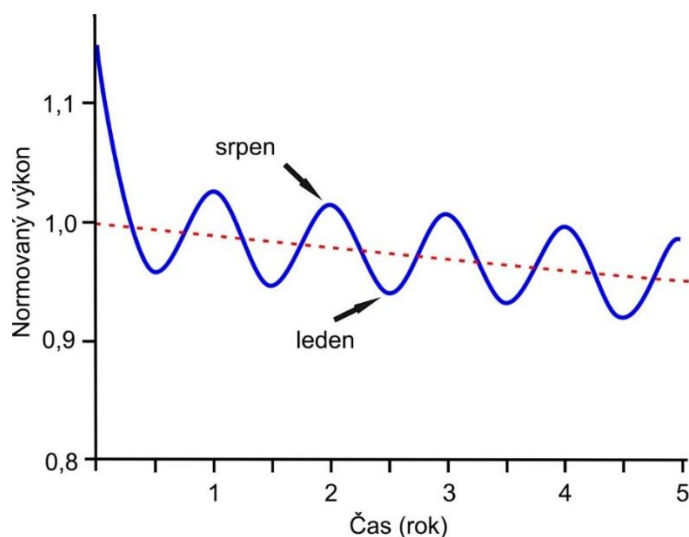
centra, která vedou ke snížení doby života nosiče náboje [38], s následným poklesem výkonu v důsledku zvýšené rekombinace. Ke snížení výkonu vlivem dlouhodobého působení UV záření dochází rovněž při snížení optické propustnosti krycích vrstev (barevná centra ve skle, žloutnutí, resp. hnědnutí EVA, delaminace apod). [39]).

Tento pokles nemůže být definován jako selhání modulu, pokud výrobce dodržel normu ČSN EN 50380 (Katalogové údaje a informace na štítku fotovoltaických modulů) a při udávání jmenovitého výkonu FV modulu s tímto poklesem počítal.

b) moduly na bázi amorfního křemíku

Podobná situace nastává i u tenkovrstvých modulů využívajících jako aktivní materiál amorfni křemík (a-Si). Tyto moduly vykazují poměrně rapidní počáteční degradaci způsobenou působením světla. Počáteční pokles výkonu může dosahovat hodnot 10 % - 30 % a projeví se zpravidla během prvních měsíců provozu [40]. Tuto degradaci je do jisté míry možné považovat za reverzibilní při použití působení tepla, což je částečně patrné i během teplých měsíců v roce, kdy dochází k sezónnímu kolísání výkonu (k tomuto jevu přispívají i další mechanismy a celý jev je pak souhrnně označován jako „season annealing“ efekt).

Pozorovaný efekt degradace v prvních měsících provozu u a-Si modulů je znám jako Staebler-Wronski efekt (SWE) [40]. V současné době je prokázáno, že jednopřechodové články se širší intrinzičnou vrstvou jsou zasaženy touto degradací mnohem více v porovnání s technologií obsahující tenčí vrstvu (a-Si moduly jsou z hlediska struktury P-i-N struktury). Čím vyšší je míra degradace, tím větší je také potenciál pro obnovení [40].



Obr. 30 Průběh dlouhodobé degenerace článku ovlivněný sezónním kolísáním

c) moduly na bázi CdTe

Také u dalších tenkovrstvých technologií dochází ke změnám výkonu v důsledku působení světla. Tyto změny výkonu mají však odlišnou příčinu než u a-Si a také zcela jiný časový průběh změny výkonu, kdy se nemusí nezbytně jednat pouze o pokles.

CdTe FV moduly typicky obsahují transparentní elektrodou z TCO, vrstvu CdS typu N následovanou absorpční vrstvou CdTe typu P a spodní metalický kontakt pro sběr proudu [21]. Návrh zadního metalického kontaktu je poměrně problematický z důvodu požadavku dobrého ohmického kontaktu s CdTe a tedy co možná největšího obsahu mědi a protichůdné difúzi mědi do vnitřní struktury a vzniku problémů s metastabilitou [41], [42].

FV moduly často vykazují počáteční pozitivní posun výkonu při vystavení světlu. Napětí naprázdno CdTe modulů může vykazovat nárůst až o $\sim 4\%$ buď díky vystavení světlu, nebo použití předpětí ve tmě. Jedná se o zlepšení výkonu, které se projeví po prvních hodinách ozáření [43]. Tento efekt je však reverzibilní a při uskladnění modulů ve tmě dochází k postupnému snižování výkonu. Tyto změny jsou přisuzovány vzniku pastí v absorbéru, které se eliminují, když je na modulu předpětí v propustném směru [43]. Z tohoto důvodu je nezbytné pro měření výkonu a účinnosti moduly před testováním stabilizovat.

Měřený výkon zařízení se může značně lišit v závislosti na postupech předběžné úpravy, jak je uvedeno například v [44].

Při dlouhodobé expozici světlem CdTe moduly obvykle vykazují snížení výkonu kvůli škodlivým trvalým změnám ve struktuře. Například moduly zmíněné např. v [45] vykazovaly počáteční zvýšení účinnosti po ozáření v řádu několika desítek hodin, nicméně při dlouhodobém působení začalo docházet k degradování.

Difúze iontů Cu od zadního kontaktu v modulech CdTe může vysvětlit mnoho pozorovaných dlouhodobých účinků vystavení světla [46], [47]. Při vyšší teplotě však dochází k difúzi Cu iontů hlouběji do struktury modulu což zvyšuje výšku zadní bariéry a snižuje fill faktor. Light soaking proto vede ke ztrátě účinnosti. Rychlost degradace se zvyšuje se vzrůstající teplotou a je podstatně rychlejší při $85\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

d) moduly na bázi CIGS

Moduly využívající jako absorbér materiál $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ (CIS/CIGS) se obvykle vytvářejí v konfiguraci s vrstvou CdS [21] (ačkoliv existují i bezkadmiové moduly – např. Solar Frontier). Zařízení CIS/CIGS vykazují dobře známou pozitivní reverzibilní metastabilitu při ozáření světlem. Napětí naprázdno se v případě jak CIS [48] tak i CIGS [49] zlepšuje o několik procent po ozáření po dobu v rozmezí od jednotek minut po jednotky hodin. Metastabilita má

významný příznivý vliv na výkon modulu. V [43] CIS články vykazovaly reverzibilní zvýšení účinnosti ~ 5% buď při expozici světlem, nebo pomocí předpětí. Vlnová délka použitého světla má vliv na intenzitu změny výkonu. „Červené“ světlo absorbované primárně ve vrstvě absorberu CIS nebo CIGS produkuje jiné efekty než „modré“ světlo, které může být absorbováno ve vrstvě CdS [50]. Nicméně CIGS moduly obecně nevykazují masivnější degradaci vlivem vystavení světlu. Obecně lze však říct, že jakýkoliv pokles vlivem lightsoakingu nelze považovat za selhání modulu, pokud výrobce správně odhadl počáteční výkon modulu a na štítku je již uváděn stabilizovaný výkon.

7.3.2 Degenerační procesy působením rozdílu potenciálu

Potenciálem indukovaná degradace (PID) je stále vážnou hrozbou, je možné očekávat intenzivnější projevy PID, pokud se začne zvyšovat provozní napětí FV systémů, nebo naroste poměr plovoucích instalací, proto je pro zvýšení spolehlivosti FV systémů a zachování jejich životnosti nutná metoda, která dokáže detekovat PID v počáteční fázi. Degradaci fotovoltaických modulů vlivem vysokého napětí poprvé popsali v roce 1978 Hoffman a Ross z Jet Propulsion Laboratory ve studii o testování v reálném čase [51]. Výkonnost fotovoltaických modulů rychle klesá při testování v laboratoři, kde je PID testován za zrychlených podmínek, jako je teplota nebo vlhkost. V případě fotovoltaických elektráren se může PID rozvíjet mnohem pomaleji a moduly ztrácejí výkon postupně, a proto nemusí být PID detekován včas. Konvenční metody pro detekci energetických ztrát fotovoltaických polí mají kombinované nejistoty měření větší než 5%, což komplikuje detekci PID [52]. Algoritmy pro odhad ztrát pomocí umělé neuronové sítě mohou snížit odhadovanou chybu až o 1%, ale vyžadují dlouhodobý výcvik. Tento způsob však není možné použít pro včasnou detekci PID. Některé metody se snaží využívat měření svodových proudů mezi články a kostrou modulu, ale detekování PID pomocí svodového proudu se ukázalo jako nepřesné, protože svodový proud nesouvisí přímo s progresí PID [53], [54].

Modifikací složení antireflexní vrstvy a laminovacího materiálu bylo dosaženo významného snížení rychlosti degradace PID u konvenčních modulů, kde je zadní strana modulu pokryta teklarem. V současné době je hodně diskutována možnost instalace plovoucích FV modulů na vodní plochy. Tento typ instalací přináší zvýšené riziko degradace PID [55]. Současné zkoušky PID free modulů jsou v souladu s normou IEC 62804, kde je zkouška prováděna při 85% vlhkosti [56], [57]. Při této vlhkosti se PID ještě nemusí projevit natolik, aby jej konvenční metody (flash test) dokázaly odhalit. V případě montáže těchto modulů v prostředí, kde bude vlhkost vyšší, mohou tyto moduly trpět PID a poměrně rychle degradovat.

Materiály, které umožňují současnou výrobu PID free modulů, nemusí být v horších podmínkách stejně účinné. Regenerace modulu pomocí napětí s opačnou polaritou je možná (včetně návratu R_P) [58], ale nemusí vést k dokonalé regeneraci, tak jak to naznačují výsledky impedanční spektroskopie. V současné době existuje mnoho zařízení, která se snaží regenerovat degradovaný modul obrácením polarity napětí a alespoň částečně zvrátit PID. Velmi často je možné se setkat s nabídkou PID regenerátorů, ale problémem je velmi často potřeba instalovat relativně velké množství těchto zařízení, obvykle jedno na několik stringů, nebo pravidelně přeinstalovávat po elektrárně. Obě tyto metody jsou relativně nákladné.

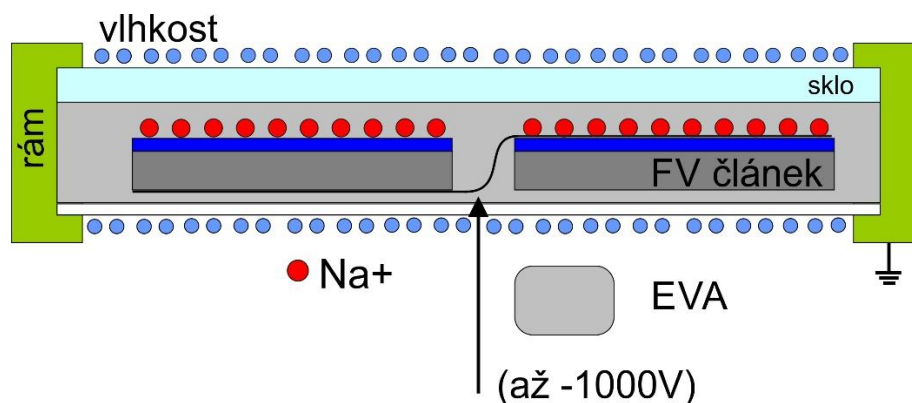
Ačkoliv je známa příčina PID, stále neexistuje široce použitelná metoda detekce, kterou lze použít v terénu pro snímání vývoje PID ve fotovoltaických modulech, s ohledem na potřebu demontáže. Nejběžnějším způsobem detekce PID je elektroluminiscence, je však časově náročná a nákladná, protože moduly musí být demontovány a testovány v laboratoři případně lze použít speciální venkovní elektroluminiscenci, která je ovšem ještě více nákladná [59]–[61]. V současné době je v terénu nejvíce používaná termografie, ale lze ji použít pouze u krystalických křemíkových modulů [62]. Tato práce představuje využití detekčních metod využívajících měření elektrických veličin, které lze nepřetržitě zaznamenávat levným zařízením. Spataru [63], Hacke [64] a Luo [65] odhadli ztrátu výkonu vlivem PID pomocí analýzy charakteristik neosvětlených modulů. Jejich technika dosahuje 3% přesnosti, při využití impedanční spektroskopie je možné zaznamenat počáteční fázi PID dříve, než dojde ke ztrátě výkonu větší než je 1%. Hodnota paralelního odporu se vlivem PID velmi významně mění [66], [67], a lze jej tedy použít k včasné detekci PID v poli dříve, než dojde k významné ztrátě výstupního výkonu.

Využití simulátoru Pasan je vhodné pro přesné stanovení výkonu, V-A charakteristiky, účinnosti a FF. Stanovení parazitních odporů pomocí směrnice tečny v krajních bodech charakteristiky se ukázalo jako nepřesné a metoda je zatížena systematickou chybou. Odhad hodnoty R_S^* a R_P^* pomocí směrnice tečny je dostačující pouze u kvalitních modulů při dostatečně velké ozáření.

U modulů z krystalického křemíku se převážně jedná o typ PID shunting (PID-s), kdy dochází ke tvorbě lokálních zkratů a tím ke značné redukci výkonu, nebo PID polarization (PID-p), kdy dochází k vytvoření vrstvy nabitých iontů na povrchu antireflexní vrstvy a následné zvýšení povrchové rekombinace. Tenkovrstvé moduly mohou také trpět PID efektem. U tenkovrstvých modulů se jedná o zpravidla nereverzibilní degradaci způsobenou elektrochemickou korozi vrstvy TCO (transparentní vodivý oxid) [68].

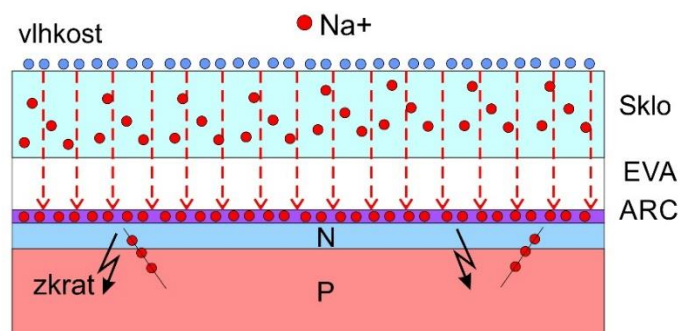
PID mechanismy

V případě, že je modul z krystalického křemíku typu P vystaven vysokému negativnímu potenciálu mezi články a rámem modulu (rám je pozitivní vůči článkům), dochází k migraci sodných iontů ze sodnovápenatého skla vrstvou EVA na povrch článků a kladně nabitě ionty se hromadí na povrchu antireflexní vrstvy (AR). Generované elektrony jsou pak přitahovány kladným nábojem nahromaděným na povrchu AR k přednímu povrchu článku, kde rekombinují. Původ iontů Na^+ je relativně jasný. Krycí sklo obsahuje 13 % až 14 % Na_2O [69]. Zvýšená povrchová rekombinace má za následek snížení napětí naprázdno U_{OC} i proudu nakrátko I_{sc} . Pod pojem PID byl efekt „polarizace“ (PID-p) zahrnut až v roce 2010 studií společnosti SOLON [70].



Obr. 31 Polarizace sodnými ionty

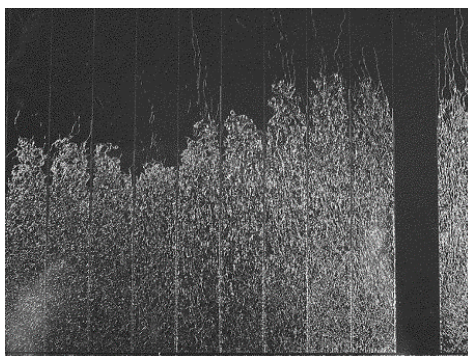
PID shunting je dalším mechanismem PID. Je to prakticky pokročilejší fáze PID-p. Vzniká po dlouhodobém působení potenciálu na modul. Principem této degradace je vytvoření vodivého spojení přes PN přechod. PID-shunting je nejběžnějším typem PID v konvenčních krystalických křemíkových fotovoltaických modulech z výchozího materiálu typu P. Vlivem potenciálu ionty sodíku (Na^+) driftují přes antireflexní vrstvu, nejčastěji tvořenou SiN_x , směrem k rozhraní mezi Si a antireflexní vrstvou a pronikají do PN přechodu. Vytvářejí tak mikrokratky, jejichž výskyt v PN snižuje účinnost FV článků. Studie ukázaly, že PID u běžných modulů z výchozího materiálu typu P je úzce spojena se snížením paralelního odporu (R_p) a zvýšením saturačního proudu při měření neosvětlených modulů [71]–[74]. Ztráta účinnosti způsobená PID je výraznější při nízkých úrovních ozáření ve srovnání se ztrátou za standardních testovacích podmínek (STC). Princip této degradace je znázorněn na Obr. 32.



Obr. 32 Polarizace sodnými ionty a vznik zkratu

U modulů s články z výchozího materiálu typu N zase dochází (pokud jsou články kladné vůči rámu) k driftu iontů CH_3COOH na pasivační vrstvu článků, kde jejich záporný náboj způsobuje výrazné zvýšení povrchové rekombinace s následným poklesem výkonu.

Dalším mechanismem PID je elektrochemická koroze kontaktů. U krystalických modulů je elektrochemická koroze minoritní problém a bývá nejčastěji na pájených spojích. Elektrochemická koroze u fotovoltaických modulů z článků ze základního materiálu typu P postihuje především místa pájení mezi sběrníci a prsty, a může být poměrně lehce odhalena kvůli rostoucímu sériovému odporu. Elektrochemická koroze je podstatně závažnější u tenkovrstvých fotovoltaických modulů [75], [76]. Příklad elektrochemické tenkovrstvého modulu je patrný na Obr. 33.



Obr. 33 Elektrochemická koroze TCO

Významnou roli opět hraje druh pouzdrícího materiálu. Některé studie dokazují, že využití ethylenvinylacetátu (EVA) je výhodnější než polyvinylbutyral (PVB), kvůli nižší elektrické vodivosti EVA až o tři řády [77]. Svodový proud určuje rychlost koroze spolu s citlivostí zapouzdřeného polovodiče. Lze konstatovat, že prakticky všechny TF moduly instalované v minulých letech vykazují náchylnost ke korozi TCO v případě působení vlhkosti a velkého rozdílu potenciálu mezi fotovoltaickými články v modulu a rámem (krycími vrstvami).

Koroze ovlivňuje maximální výkon modulů, zvýšením sériového odporu a pokles paralelního odporu. Velice dobře je koroze TCO odhalitelná pomocí elektroluminiscence, která

umožňuje detekovat korozi v dřívější fázi. Korozi dále ovlivňuje způsob montáže modulu, a rozměry okrajů modulů, které umožňují snadnější pronikání vlhkosti do modulu [77].

7.3.2.1 Možnosti regenerace modulů s PID

Vzhlede k tomu, že PID je vyvolán driftem iontů ve stejnosměrném elektrickém poli, je možné dosáhnout změnou polaritu migraci iontů opačným směrem. Regenerace modulu pomocí napětí s opačnou polaritou je možná [78]. Polarita a velikost napětí článků v modulu vůči uzemněnému rámu modulu závisí v případě použití beztransformátorových modulů na poloze modulu v řetězci. Jednou z cest ochrany proti PID je periodická výměna pozice modulů v řetězci. Tento způsob je náročný na montážní práce (montáž – demontáž) a ve výsledku celkem nákladný. Druhou možností je v době, kdy systém nevyrábí odpojit fotovoltaické pole od měniče a mezi uzemněný rám a FV články v modulech připojit zdroj napětí s polaritou, způsobující drit iontů opačným směrem než při PID. V současné době existuje řada zařízení, která se snaží regenerovat degradovaný modul obrácením polaritu napětí a alespoň částečně zvrátit PID.

8 Metody pro diagnostiku modulů a článků.

Před zahájením a během provozu fotovoltaických systémů je třeba ověřit, zda použité komponenty, v tomto případě PV moduly, splňují parametry deklarované výrobcem a splňují parametry zajišťující bezpečnost provozu systému. K prověření důležitých parametrů je možné využít základní diagnostické metody, které mají oporu v normě ČSN EN 61215. Jedná se zejména o následující zkoušky.

Přesný název zkušební postupu/metody	Identifikace zkušební postupu/metody
Měření Volt-Ampérových charakteristik	ČSN EN 60904-1; ČSN EN 61215-1 a 61215-2 čl. 10.2, 10.6, 10.7
Měření elektrické pevnosti	ČSN EN 61730-2 MST 16; ČSN EN 61215-1 a 61215-2 čl. 10.3
Měření izolačního odporu napětím	ČSN EN 61215-1 a 61215-2 čl. 10.3
Měření vodivosti kostry proudem	ČSN EN 61730-2 MST 13
Vizuální kontrola	ČSN EN 61215-1 a 61215-2 čl. 10.1

Tabulka 3: Základní diagnostické metody

Mimo tyto metody, určené ke kontrole parametrů jednotlivých modulů, existují další metody, umožňující vyhledat potenciálně poruchové moduly v instalacích např. použitím metod využívajících detekci nerovnoměrné distribuce teploty. Další možností jsou metody využívající měření VA charakteristik jednotlivých řetězců nebo modulů přímo v systému za venkovních podmínek. Tyto metody je možno využít k hledání příčin poruch modulů nebo indikaci degradačních procesů v modulech pracujících ve fotovoltaické instalaci. Je také možno využít metody založené na měření dalších elektrických parametrů. Základními i doplňkovými diagnostickými metodami se zabývají následující odstavce.

8.1 Vizuální kontrola

Jedná se o nejrychlejší a nejjednodušší způsob, jak najít zjevnější poruchy a závady na FV modulu. Vizuální kontrola je prováděna podle normy (ČSN EN 61215-2 čl. 10.1) [79]¹ je poměrně snadná, ovšem provádět vizuální kontrolu na již instalovaných modulech je již

¹ Dříve byla v platnosti také norma ČSN EN 61646 [80] týkající se tenkých vrstev, v současné době jsou obě normy sloučeny do normy ČSN EN 61215, která řeší zvlášť postupy – 61215-1, resp. 61215-2 a zvlášť technologická specifika 61215-1-X

obtížnější, neboť je kontrola ztížena klimatickými podmínkami a možným znečištěním modulu, které způsobí přehlédnutí jinak majoritní vizuální vady (definice majoritní vizuální vady je uvedena v článku 7 normy ČSN EN 61215-2 [79]). Seznam jednotlivých defektů, který umožňuje jednoduší identifikace poruch v terénu, ale i v laboratoři, je uveden v příloze.

8.1.1 Vizuální kontrola v souladu s normami IEC PV

Vizuální kontrola FV modulu by se při výrobě měla provádět před a po testování modulu, kdy je modul záměrně vystaven vlivům okolního prostředí, nebo mechanicky, popřípadě elektricky namáhán. Stresové testy jsou obvykle využívány před zahájením sériové výroby, a to za účelem zjištění jakosti výroby, a životnosti modulů. Nejběžnější zátěžové testy jsou: teplotní cyklování, vliv vlhkosti při nízkých i vysokých teplotách, dále vliv UV záření, nebo vliv mechanického zatížení simulující vliv působení větru, krupobití a zatížení sněhem.

V případě provádění vizuální kontroly FV modulů je nezbytné podle normy (ČSN EN 61215 čl. 10.1) zajistit osvětlení prostor, kde je vizuální kontrola prováděna. Je vyžadováno osvětlení dosahující hodnoty minimálně 1000 luxů. Během vizuální prohlídky jsou zaznamenávány vady, které jsou viditelné pouhým okem, základní popis vad je prezentován také v příslušné normě.

Část modulu, která je zasažena defektem	Popis defektu
Přední strana	bubliny, delaminace, zažloutnutí, zhnědnutí, degradace se převážně týkají stárnutí EVA fólie
Jednotlivé články	zlomené články, změna barvy antireflexní vrstvy
Kontaktování článků	jedná se hlavně o korozi metalických kontaktů na článku, popřípadě nedokonalé pájení
Rám	jedná se hlavně o mechanické poškození rámu, které má za následek nepřiměřené mechanické namáhání celého modulu
Zadní strana modulu	bubliny, delaminace, zažloutnutí, zhnědnutí, případně tavení nebo zahoření zadní krycí fólie (nejčastěji tedlar)
Junction box	oxidace, nebo koroze, popřípadě úplné oddělení boxu od modulu
Konektory, vodiče	křehnutí plastů a následný rozpad

Tabulka 4: Seznam poruch modulů podle normy ČSN EN 61215 čl. 10.1

Při důkladně provedené vizuální kontrole je vhodné zaznamenat všechny viditelné vady i v případě, že se jedná o minoritní nebo nepodstatné vady [37]. To je vhodné pro další sledování

vývoje vad, které se mohou rozšiřovat právě vlivem působení okolního prostředí. Pro vypovídající dokumentaci by měla být dodržována následující pravidla: fotografie jednotlivých vad musí být pořízeny s ohledem na možný odraz blesku nebo světla, pozice a rozměr každé vady by měl být dokumentován. Je nezbytné, aby veškerý personál provádějící vizuální kontrolu používal k popisu vad jasně určené pojmy a definice. Tato jednoduchá standardizace, alespoň ve stejné laboratoři, je nezbytná pro minimalizaci následných interpretačních chyb způsobených individuálním posouzením. Hlavní vizuální vady, které mohou způsobit selhání FV modulu, jsou definovány a popsány v Příloze 1.

8.2 Měření statických charakteristik - Volt-Ampérové charakteristiky

Jedná se o základní diagnostiku fotovoltaického modulu, na jejímž základě je možné podávat případné reklamace u výrobce modulu. Měření VA charakteristiky umožňuje určit, zkratový proud, napětí naprázdno, a další parametry. Měření může být v případě modulů provedeno i přímo na venkovní instalaci, ale své uplatnění nachází zejména v laboratoři, kde je možné dodržet specifické, tzv. standardní testovací podmínky (STC). V praxi se nejčastěji provádí měření pomocí zábleskového solárního simulátoru, tzv. flash testeru.

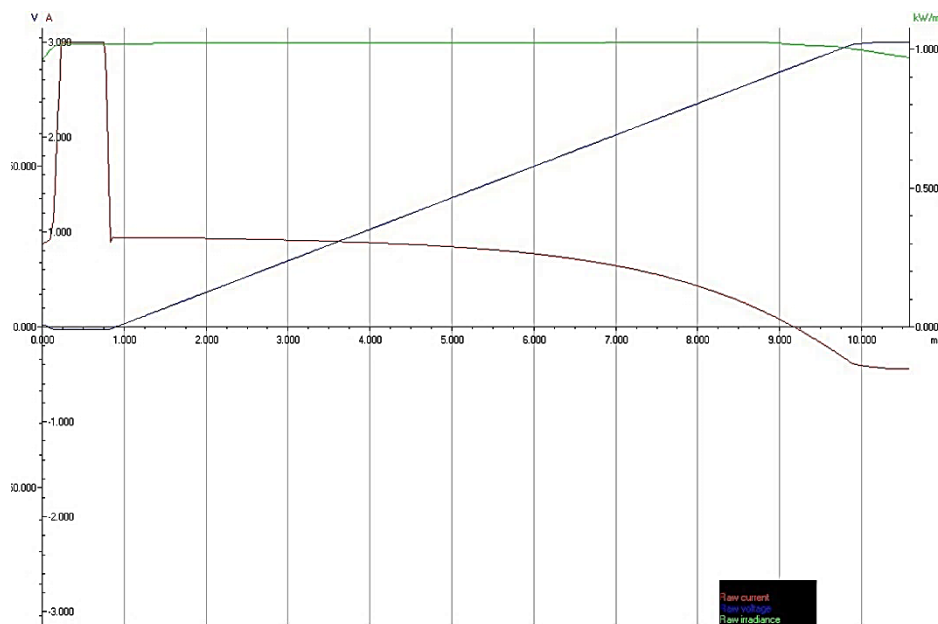
Flash tester je zařízení, kde se jako zdroje záření používá umělého zářiče, který ozařuje měřený modul pouze po krátký časový interval. Zdroj záření musí splňovat podmínky z hlediska spektra záření, rovnoměrnosti ozařované plochy a časové stability záření. Nejčastějším používaným zdrojem jsou xenonové výbojky, jejichž spektrální intenzita záření je nejbližší ke skutečnému slunečnímu záření. Výbojky jsou napájeny z kapacitního zdroje a produkují záření dle STC, tzn. $G = 1000 \frac{W}{m^2}$ s rozložením spektra AM 1.5 (ČSN EN 60904-2), které odpovídá slunečnímu záření dopadajícímu za jasného počasí na zemský povrch v nulové nadmořské výšce pod úhlem $48,2^\circ$. Pro účely této disertační práce byla měření prováděna na zařízení Pasan SunSim IIIc, který je zařazen do nejvyšší možné třídy A+/A+/A+ dle normy IEC 60904-9 (nehomogenita záření $<1\%$, dlouhodobá nestabilita záření $<1\%$, spektrum záření $\leq 12,5\%$). Jako zdroj záření je zvolena xenonová výbojka, která zajistí spektrum světla odpovídající slunečnímu záření. Xenonové výbojky poskytují dobrou shodu se slunečním spektrem, nicméně je třeba filtrovat infračervenou oblast vykazující vyšší spektrální intenzity záření. Rovnoměrné rozložení intenzity záření je v případě Pasan SunSim IIIc zajištěno dostatečnou předem definovanou vzdáleností testovaného modulu od bodového zdroje záření.

Pomocí krátkého výboje, v našem případě 10 ms, je také zabráněno ohřevu FV modulu během měření. Systém také obsahuje referenční článek pro sledování intenzity záření během měření. Během krátkého záblesku jsou změřeny a zaznamenány body V-A charakteristiky, které jsou poté přeneseny do počítače pro vyhodnocení. Z naměřené charakteristiky jsou pak určeny parametry modulu (I_{SC} , U_{OC} , P_{MAX} , U_{MP} , I_{MP} , FF) a dále jsou stanoveny hodnoty R_S^* a R_P^* pomocí metody derivace rovnice v krajních bodech V-A charakteristiky. Způsob stanovení parametrů z naměřené V-A charakteristiky byl podrobně diskutován v kapitole 4.4.

Hlavní částí Pasan SunSim IIIc je elektronická zátěž, řídicí elektronika s rozhraním, napájecí zdroj a generátor pro výbojku. Elektronická zátěž je založena na výkonovém napěťovém zdroji, který nastavuje pracovní bod na V-A charakteristice FV modulu.

Při zahájení měření dojde k nastavení měřících rozsahů a rozsahu napěťového zdroje, spuštění výboje a při dosažení nastavené úrovně intenzity dojde ke spuštění měření.

Měření trvá 10 ms, intenzita záření je na začátku a na konci měření nižší a ve střední části měření mírně vyšší nežli požadovaná hodnota měření, jak ukazuje Obr. 34.



Obr. 34 Průběh intenzity záření během flash testu (zelená linka)

Senzor ozáření využívá malý kalibrovaný FV článek a výsledný měřený proud FV modulu je korigován dle vztahu

$$I_{COR} = I_M \frac{G_{NOM}}{G_M} [1 + K_{TI}(T_{NOM} - T_M)] \quad (8.1)$$

kde I_{COR} a I_M je korigovaný a měřený proud, G_M a G_{NOM} je měřená a požadovaná intenzita záření, T_M a T_{NOM} je měřená a nominální teplota FV článku, K_{TI} je teplotní koeficient proudu, pro který platí $K_{TI} > 0$.

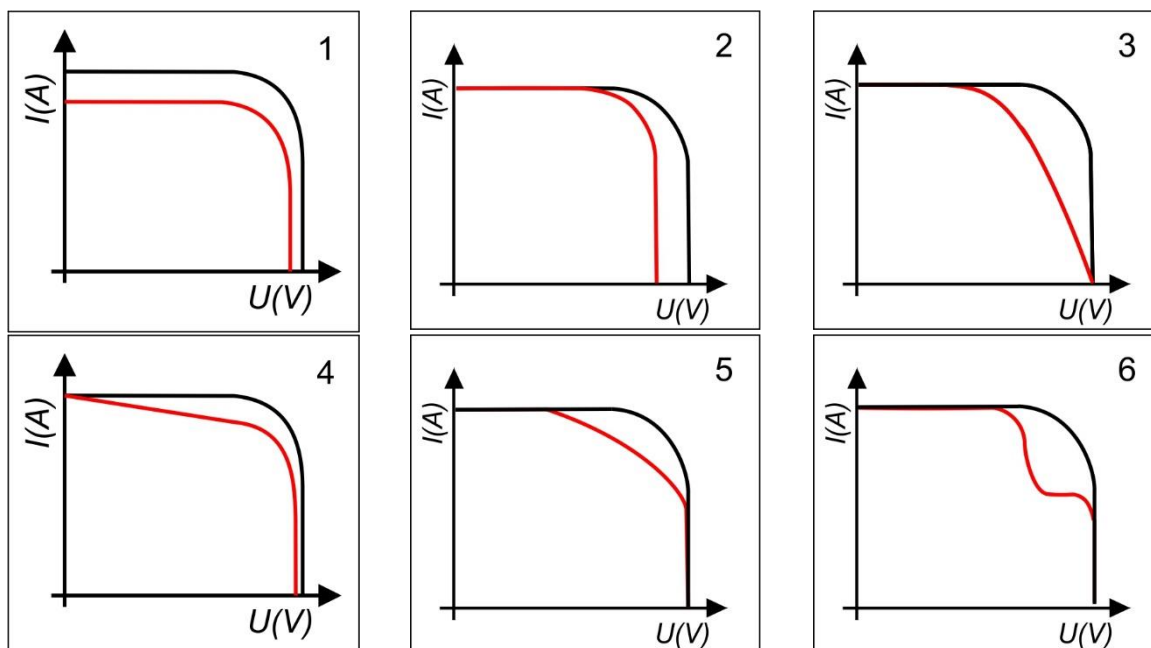
U senzoru ozáření je navíc pro korekci měřené intenzity snímána teplota. Tato teplota může být použita dále i pro korekci proudu a napětí měřeného vzorku (FV modulu) v případě požadavku na měření při předem určené teplotě (např. měření při STC).

Zábleskové solární simulátory lze dále rozdělit na jednopulzní a vícezdrojové. Různé umělé světelné zdroje mohou být používány pro různé FV technologie. Například, FV moduly s velkou kapacitou C_D potřebují mnohem delší dobu impulsu pro změření VACH, než v současné době běžně instalované moduly. Typická doba trvání světelných impulsů pro solární simulátory se obvykle pohybuje v rozmezí od 1 ms do 20 ms s různými profily. Tyto časové intervaly jsou příliš krátké na diagnostiku některých typů fotovoltaických modulů, jako je heterogenní (HIT) fotovoltaický modul [37]. Články těchto FV modulů mají vysokou dobu života nosičů náboje, a proto poměrně vysokou difúzní kapacitu, která vede k nutnosti delšího světelného impulsu, aby bylo možné vybití/nabití této kapacity. Pro tyto typy modulů je nezbytné použít světelný impuls o délce kolem 50 ms a více. Postupy, které je nutné dodržovat u měření vysoce účinných modulů, jsou popsány v literatuře [81]. Podobný problém je možné pozorovat i u tenkovrstvých modulů. Výkon tenkovrstvých modulů je navíc ovlivněn světelnou a teplotní historií modulu. Proto je nezbytné měřit tenkovrstvé moduly co nejdříve po demontáži ze systému. V případě delší relaxace v laboratoři by byly výsledky měření velice nepřesné a nereprezentovaly by skutečný výkon modulu (odchyly mohou být řádově až 10 %) [82].

Odchyly mezi hodnotou získanou měřením a očekávanou hodnotou získanou z datových listů nebo z předchozích měření mohou indikovat jednu z následujících poruch [37], viz Obr. 35.

Případ 1 je pravděpodobně způsoben ztrátou transparentnosti zapouzdření v důsledku zhnědnutí nebo žloutnutí, nebo možné koroze skla. Podobné problémy, snížení zkratového proudu I_{SC} , může také způsobit delaminace a následné zhoršení vlastností optických vrstev. Tyto závady se na VACH nejčastěji projeví podobně jako měření za snížené intenzity. S touto změnou se projeví i mírné snížení U_{OC} .

Případ 2 ukazuje snížení napětí na prázdko U_{OC} . Poruchy, které snižují napětí naprázdno, jsou obvykle spojeny s nečinností některých článků v modulu, a to buď kvůli špatnému nakontaktování, nebo zkratování článku jako takového. Dalším důvodem poklesu napětí naprázdno může být selhání (zkrat) by-pass diody [37].



Obr. 35 Deformace volt ampérová charakteristiky způsobených defekty

V případě 3 je pozměněn sklon VACH v blízkosti U_{OC} . Tato změna indikuje zvýšení sériového odporu fotovoltaického modulu popřípadě celého stringu, pokud se jedná o měření přímo v terénu. Příčinou zvýšení sériového odporu může být koroze kontaktování jednotlivých článků případně v junction boxu. Zvýšení sériového odporu celého stringu může být zapříčiněno nedokonalým pospojováním jednotlivých modulů. Oba případy však mají za následek snížení fill faktoru a tím i maximálního výstupního výkonu modulu.

V případě 4 je jasně patrné snížení paralelního odporu. Snížení paralelního odporu může indikovat závažnou degradaci modulu jako je PID efekt. Celkově se ukazuje, že vyhodnocování změny paralelního odporu je velmi vhodnou metodou k odhalení i počátečních změn ve struktuře článku nebo modulu, které postupně mohou vést k úplnému selhání modulu. Pokles R_p bývá také spojen s poklesem U_{OC}

Případ 5 je velice často způsoben degradací antireflexní vrstvy nebo PID efektem. Velice často lze tento jev pozorovat u tenkovrstvých modulů na bázi a-Si:H kdy je způsoben degradací samotné aktivní vrstvy.

Případ 6 ukazuje jasnou aktivaci bypass diody. Důvodem vzniku tohoto tvaru křivky by mohlo být poškození jednoho nebo více článků, případně silné znečištění jednoho nebo více článků nebo výrazný rozdíl v kvalitě použitých článků při výrobě modulu.

Mezi základní diagnostické metody dle ČSN EN 61215 patří také metody měření elektrické pevnosti, izolačního odporu a vodivosti kostry. Izolační odpor je parametr zajišťující bezpečnost fotovoltaického modulu. V případě poklesu izolačního odporu v důsledku degradace modulu a následnému pronikání vlhkosti, může dojít k automatickému

bezpečnostnímu vypnutí měniče, nebo k jeho poškození [39]. Měří se odpor mezi rámem modulu a výstupními svorkami. K měření se používá vysokonapěťový zdroj. Zároveň je možno měřit elektrickou pevnost a vodivost kostry. Splnění podmínek daných normou ČSN EN 61215-2 je nezbytné pro bezpečný provoz modulů.

8.3 Termografie

Termografické měření je v poslední době velice populární a rozšířené jak mezi majiteli poměrně malých střešních instalací, tak hlavně mezi majiteli velkých solárních parků. Jedná se o rychlou nedestruktivní metodu, která může odhalit přesnou polohu vadného modulu a tím pomoci k lepšímu provozu fotovoltaických elektráren. Ve své podstatě neexistuje alternativa, jak ve velkých instalacích rychle nalézt vadný modul, který je nutno převést k další diagnostice do laboratoře, a proto je v dnešní době termografické měření rychle se rozvíjející metoda diagnostiky.

V podstatě existují tři různé metody termografie. Nejběžnější a nejjednodušší metodou je termografie při provozu. Tato metoda právě umožňuje analýzu fotovoltaických modulů přímo v terénu bez přerušení provozu. Dalšími metodami jsou lock-in termografie a pulsní termografie, které umožňují podrobnější pohled na fotovoltaický modul. Nevýhodou obou těchto technik je nutnost převozu zkoumaných modulů do laboratoře. Tyto tři techniky jsou popsány v následujících kapitolách.

8.3.1 Termografie při provozu

Termografie je nedestruktivní měřicí technika, která může být použita jako způsob pro bezkontaktní diagnostiku některých, tepelně se projevujících, poruch FV modulů. Měření může být provedeno při normálním provozu, a to jak pro jeden samostatný modul, tak i pro rozsáhlý systém.

Teplotu článku T_c uvnitř modulu pracujícího při teplotě okolí T_a je možno vyjádřit vztahem

$$T_c = T_a + r_{thca} p_{th} \quad (8.2)$$

kde r_{thca} je tepelný odpor mezi článkem a okolím vztažený na jednotku plochy,

p_{th} je hustota generovaného tepelného výkonu.

Při normálním provozu článku při ozářenosti G odrazivosti přední plochy modulu \mathfrak{R} a účinnosti článku η je

$$p_{th} = G(1 - \mathfrak{R})(1 - \eta) \quad (8.3)$$

Generované teplo je odváděno na oba povrchy modulu, odkud je rozptylováno do okolí.

r_{thca} je možno vyjádřit vztahem

$$r_{thca} = \frac{r_{thcab}r_{thcaf}}{r_{thcab} + r_{thcaf}} \quad (8.4)$$

kde

$$r_{thcaf} = \frac{d_f}{\kappa_f} + \frac{1}{h_f} \quad (8.5)$$

a

$$r_{thcab} = \frac{d_b}{\kappa_b} + \frac{1}{h_b} \quad (8.6)$$

kde d_f je tloušťka přední krycí vrstvy, d_b je tloušťka zadní krycí vrstvy, κ_f je tepelná vodivost přední krycí vrstvy, κ_b je tepelná vodivost zadní krycí vrstvy h_f je koeficient přestupu tepla do okolí z přední strany modulu (obvykle skla) a h_b je koeficient přestupu tepla do okolí ze zadní strany modulu.

Pokud je účinnost některého článku snížena, dochází k lokálnímu nárůstu teploty článků a v důsledku toho k lokálnímu nárůstu teploty povrchu modulu, odkud generované teplo přestupuje do okolí.

Teplotu předního povrchu T_{fs} lze aproximovat

$$T_{fs} = T_c - \frac{d_f}{\kappa_f} p_{th} \quad (8.7)$$

a analogicky je pak možné vyjádřit teplotu zadního povrchu.

Při diagnostice FVE termokamerou je však nezbytné dodržovat jisté zásady, které ovlivňují kvalitu dosažených výsledků. Přesnost měření je určena více faktory. Jde především o vlivy okolí. Jedná se zejména o teplotu okolí, vlhkost vzduchu i o prašnost prostředí, ve kterém měření probíhá. U komerčně používaných IR kamer se kompenzuje pět vlastností okolí a měřeného objektu, které nepříznivě ovlivňují měření.

- atmosférická teplota,
- vlhkost vzduchu,
- vzdálenost od objektu,
- zdánlivá odražená teplota
- emisivita.

Při diagnostice FVE je však důležitý ještě jeden faktor, a to intenzita záření a oblačnost v místě a čase měření. Je nezbytné, aby v průběhu měření dopadalo na fotovoltaické moduly sluneční záření o intenzitě nejméně 700 W/m^2 při ideálně bezmračné obloze. Jedná se o minimální hranici, při které má měření ještě smysl. Diagnostikovat FVE při vyšších

hodnotách je samozřejmě mnohem účinnější, a to z důvodu, že defekty jsou viditelné pouze při zatížení modulů, a to vzniká právě přeměnou dopadajícího slunečního záření. Moduly samozřejmě pracují i při 200 W/m² nebo méně, ale tepelné rozdíly jsou patrné až při vyšších výkonech.

Jako další zásadu nebo doporučení je možné považovat fakt, že okolní teplota, stejně jako rychlost větru by měly být dostatečně nízké. Zorný úhel pozorování by měl být nejlépe roven 90°, rozhodně by však neměl dosahovat hodnot menších než 60° vzhledem k rovině modulu. Je samozřejmě nezbytné vyvarovat se chyb vzniklých v důsledku odrazů od okolních objektů, a to včetně pozorovatele a termokamery. Důležité také je správné nastavení emisivity. Typické hodnoty emisivity jsou: 0,85 pro sklo a 0,95 pro polymer zadní vrstvy. Měření je vhodné provádět ze zadní strany modulu (pokud je to možné), a to z důvodu transparentnosti polymeru pro IR a minimálním odrazům. Využívat termografii pro diagnostiku PID efektu tenkých vrstev bohužel není možné. Evaluace termogramů z pohledu vlivu na výkon byla publikována např. v [59], [83].

8.3.2 Lock-In termografie

Jedná se opět o nedestruktivní testovací metodu. Na rozdíl od metody termografie, která využívá běžně dostupné termokamery, které lze použít za provozu, Lock-In termografie umožňuje zkoumat jak moduly z krystalického křemíku, tak hlavně i tenkovrstvé technologie, pro které je běžná termokamera nevhodná.

Lock-in termografie je založená na řízeném tepelném toku a jeho modulaci. Tepelná odezva zkoumaného objektu je vybudena pomocí externího zdroje, který musí být synchronizován se signálem odečítaným z kamery. Pro buzení se tedy využívá impulsního, např. sinusového zdroje signálu. Lock-in termografii používanou pro diagnostiku fotovoltaických článků a modulů lze rozdělit na dva druhy, a to Dark Lock-In termografii (DLIT), která využívá pro buzení přiložené napětí v propustném směru, a tedy není zapotřebí světelného zdroje a Illuminated Lock-In termografii (ILIT), která využívá k detekci dopadající infračervené záření.

Při ILIT, je zkoumaný předmět, v našem případě fotovoltaický modul, ozařován IR zářením se sinusovým průběhem. Záření proniká dovnitř modulu a v místě anomálie struktury materiálu se odráží zpět k povrchu. Zvýšení teploty se projevuje jednak u „nepracujících“ částí modulů (např. sub-řetězec překlenutý BP diodou, nebo části s velkou rekombinační rychlostí), kde se většina absorbovaného zářivého výkonu mění na teplo, nebo v místě lokálního přetížení (hot spots). Na povrchu modulu dochází k interferencím modulem vyzařovaného a na modul dopadajícího tepelného toku, kdy potom termogramy snímané termografickou kamerou jsou

modifikovány tepelnou vlnou emitovanou z vnitřku diagnostikovaného modulu. Rozborem signálu z každého pixelu detektoru kamery lze stanovit odděleně jak amplitudu, tak i fázový posuv odezvy. Amplituda signálu z jednotlivých pixelů je ovlivněna nehomogenitou parametrů (emisivita, pohltivost) a nehomogenním rozložením dopadajícím tepelným tokem na povrch objektu. Avšak ve fázové modulaci jsou uvedené efekty vyloučeny a metoda lock-in poskytuje nezkreslené informace o „podpovrchové“ teplotě objektu [84]. Jelikož se jedná o snímání přechodných dějů, je možné tuto metodu aplikovat i na tenkovrstvé technologie, kde je použití klasické termografie z důvodu konstrukce modulů prakticky vyloučené.

8.3.3 Pulzní termografie.

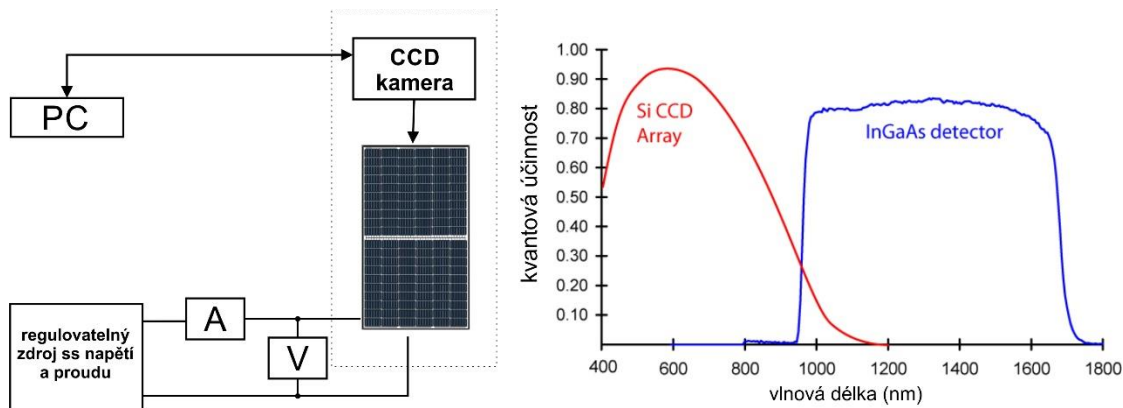
Pulzní termografie spočívá v rychlém (pulzním) externím nebo interním ohřevu tělesa a následném vyhodnocení teplotního pole na povrchu tělesa pomocí termokamery. Podle uspořádání zdroje ohřevu, objektu a kamery se pulzní metoda dělí na reflexní a transmisní. Teplota povrchu se rychle mění po řízené pulzní stimulaci vlivem rozptylu tepelné vlny. Defekt v tělese způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny a na teplotním poli na povrchu lze pak pozorovat oblasti s rozdílnou teplotou [59]

Doba trvání pulsu nesmí být delší než několik milisekund, a to z důvodu zachování ostrosti výsledného termogramu. Intenzita záblesku by měla být dostatečně velká, aby se povrchová teplota modulu okamžitě zvýšila o 1 až 5 K a to homogenně. Termokamera, která snímá výsledný obraz, musí mít vysokou snímací frekvenci, a to desítky až stovky Hz [84].

8.4 Elektroluminiscence

Elektroluminiscence (EL) fotovoltaických článků a modulů je založena na principu zářivé rekombinace párů elektron - díra. Energie fotonů emitovaných mezipásmovou zářivou rekombinací je velmi blízká šířce zakázaného pásu polovodičového materiálu. Široce se používá EL jako diagnostický nástroj pro analýzu defektů na FV článcích a modulech, primárně při výrobním procesu a laboratorních diagnostiky fotovoltaických modulů. Moduly jsou propustně polarizovány a dochází k injekci nerovnovážných nosičů náboje, s jejichž koncentrací je spojena zářivá rekombinace, takže je možno z intenzity rekombinačního záření identifikovat místa s nízkou koncentrací nerovnovážných nosičů (tj. buď místa do kterých neteče proud, nebo místa s vysokou koncentrací rekombinačních center). Jako čidla rekombinačního záření se používají křemíkové čipy (CCD), nebo InGaAs detektory. Krystalické křemíkové články (c-Si) vyzařují v blízkosti infračerveného světla a rozsah

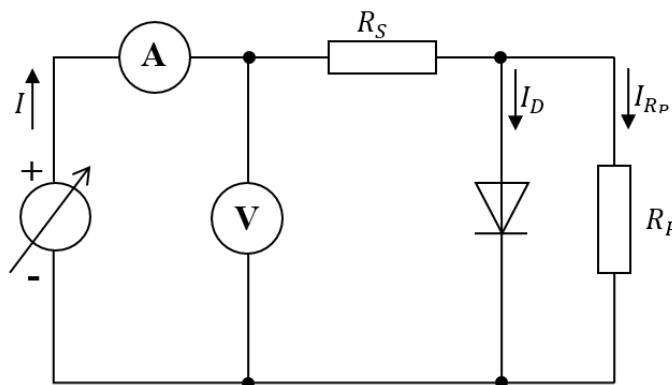
vlnových délek je od 1000 nm do 1200 nm. Elektroluminiscencí lze tedy snadno detekovat praskliny a jiná poškození, protože intenzita emitovaného záření je úměrná koncentraci nerovnovážných nosičů ve struktuře FV článků. Běžně se používají křemíkové čipy (CCD) nebo InGaAs. EL je rychlá technika pro detekci vad, které lidské oko nevidí. Metoda se nedá použít u amorfního křemíku, kde je rekombinace převážně nezářivá. Jednoduché schéma zapojení a citlivost jednotlivých typů kamer je na Obr. 36



Obr. 36 Schéma zapojení elektroluminiscenčního měření

8.5 Měření Volt-Ampérových charakteristik neosvětlených článků a modulů

Měření charakteristik neosvětleného článku (modulu), připojeného na vnější zdroj, je způsob, jak odhadnout kvalitu PN přechodu. Základní zapojení je znázorněno na Obr. 37



Obr. 37 Schéma zapojení měření neosvětlených článků

V takovém případě je možno V-A charakteristiku neosvětleného článku vyjádřit s ohledem na sériový a paralelní odpor vztahem

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{\xi k T} (U - IR_s) \right) - 1 \right] + \frac{(U - IR_s)}{R_p} \quad (8.8)$$

kde q je elementární náboj, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota, I_0 je saturační proud diody, ξ je faktor kvality diody, R_S je sériový odpor a R_P je paralelní odpor. V průběhu let bylo navrženo několik metod pro extrakci těchto parametrů z neosvětlené křivky V-A [85].

Pokud budeme uvažovat malé proudy, při kterých bude napětí na přechodu PN $U < \frac{kT}{q}$, můžeme za předpokladu malého R_S zjednodušit vztah pro výpočet R_P

$$R_P \approx \frac{U}{I} \quad (8.9)$$

I když je tato aproximace relativně nepřesná, může být použitelná pro stanovení paralelního odporu modulů v aplikacích

8.6 Impedanční spektroskopie

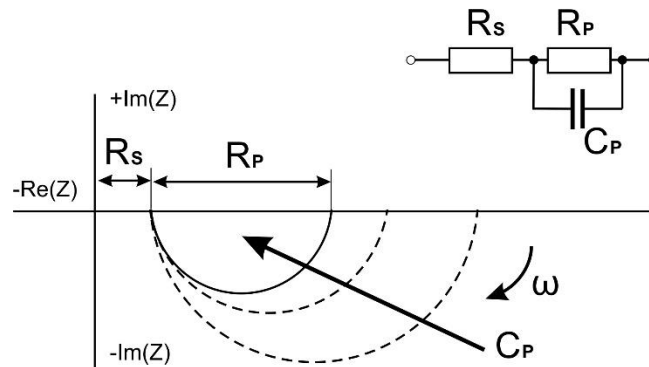
Fotovoltaické moduly jsou uvažovány především jako stejnosměrná zařízení (generátory stejnosměrného napětí/proudu). Z hlediska jejich struktury však existují parazitní kapacity, které se mohou projevit při aplikaci střídavých signálů, zejména malých střídavých napětí. Základní představy o kapacitním chování přechodu PN byly zpracovány v kapitole 4.3.

Zjednodušenými postupy můžeme vypočítat parametry náhradního střídavého modelu. Teoreticky očekávané chování impedance Z ekvivalentního obvodu je dána:

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) = R_S + j\omega L + \frac{R_P}{1 + jR_P\omega C} \quad (8.9)$$

Střídavé parametry fotovoltaických systémů mohou být měřeny technikou frekvenční domény nebo technikou časové domény (měření přechodné odezvy). V technice frekvenční domény se kolem provozního bodu (daného stejnosměrným napětím) aplikuje malý signál a měří se hodnoty ustáleného stavu AC parametrů. V technice časové domény se napětí článku nebo modulu mění od zkratu k otevřenému obvodu nebo naopak. Techniky časové domény nebo frekvence mají určitá omezení a nevýhody pro měření na fotovoltaických článcích a modulech, a proto musí být vybrány podle parametrů konkrétního zařízení, které chceme měřit. Impedanční spektroskopie (IS) je charakterizována měřením a analýzou některých nebo všech impedančních funkcí elektronického zařízení. Při vyhodnocování IS se komplexní impedance $Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$ testovaného modulu měří přímo ve velkém frekvenčním rozsahu pomocí LCR metru. Na konektory testovaného modulu se aplikuje čistě sinusové napětí s proměnnou frekvencí a měří se fázový posun a amplituda napětíových a proudových signálů. Vypočítá se poměr mezi přivedeným napětím a výsledným proudem, což dává impedanci $Z(\omega)$

testovaného zařízení. Graf $R(\omega)$ a $X(\omega)$ v komplexní rovině, v závislosti na měnící se frekvenci, dává impedanční spektrum zařízení, v našem případě modulu, nebo článku. Tento graf je zvláštním případem Nyquistova diagramu nazvaného Cole-Cole diagram [86]. Konstrukce Cole-Cole diagramu umožňuje jednoduché vyhodnocení parametrů a také kvality testovaného modulu. Obr. 38. ukazuje typický Cole-Cole diagram pro kapacitní charakter testované součástky (FV modulu).

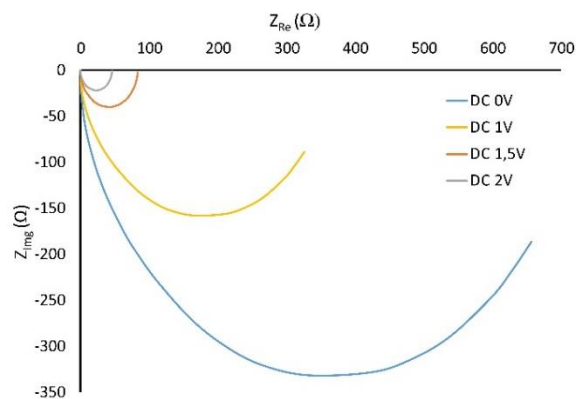


Obr. 38 Cole-Cole diagram FV

Tloušťka oblasti prostorového náboje v PN přechodu (a tedy také kapacita PN přechodu) silně závisí na použitém napětí. Pokud aplikujete napětí v opačném směru (kladný potenciál na N), oblast prostorového náboje se rozšíří; pokud je polarizován v propustném směru (záporný potenciál na N), oblast prostorového náboje se zužuje. Použitím střídavého signálu pro měření se pak v jedné polovině periody aplikovaného napětí kapacita snižuje, ve druhé polovině periody se zvyšuje. Proto by hodnota AC napájecího napětí (měřicí signál) měla být velmi malá (v rozsahu milivoltů), aby neměly významný vliv na naměřené hodnoty.

Naměřené hodnoty mohou být významně ovlivněny také stejnosměrným předpětím, které může změnit pracovní bod článku (nebo modulu) a ovlivnit tak naměřený Cole-Cole diagram a parametry, které mají být extrahovány [87]–[90]. Ozáření modulu způsobuje předpětí DC; z tohoto důvodu je doporučeno provádět měření střídavého proudu za tmy.

Vliv předpětí na parametry minimodulu, sestávajícího ze čtyř do série zapojených křemíkových článků je znázorněn na Obr. 39.



Obr. 39 Cole-Cole diagram *FV* modulu složeného ze 4 článků a změny diagramu v závislosti na předpětí.

Důvodem jsou vlastnosti PN přechodu a změny obou kapacit, zejména přechodové kapacity. Stejnoseměrné předpětí také ovlivňuje hodnotu paralelního odporu, který klesá s rostoucím napětím v propustném směru, což se dá vysvětlit zmenšováním tloušťky oblasti prostorového náboje přechodu. Otázkou je, která hodnota DC předpětí by mohla být nastavena pro dosažení hodnot parametrů odpovídajících hodnotám získaným standardními metodami měření, jako je měření křivky V - A charakteristiky za STC (standardní testovací podmínky).

Většina komerčních nástrojů používaných k realizaci měření impedanční spektroskopie fotovoltaických modulů je založena na metodě Auto Balancing Bridge. Metoda automatického vyrovnávacího můstku je vhodná pro analýzu impedance fotovoltaických zařízení, protože představuje vysokou přesnost v kmitočtovém pásmu, které potřebujeme k měření hodnot parametrů fotovoltaických článků a modulů, okolo 1 Hz - 100 KHz. Menší přesnost, metody při vysokých frekvencích (vyšších než 1 MHz), nemá výrazný vliv na měření fotovoltaických článků a modulů. Podrobněji je vliv předpětí diskutován v [88]. Experimentální ověření použitelnosti metody impedanční spektroskopie na souboru modulů z krystalického Si a tenkovrstvých (micromorf) modulů je popsáno v kapitole 9.1.

9 Aplikace diagnostických metod

Hlavním parametrem, který je ovlivněn přítomností defektů modulu, je výkon modulu, nicméně změny některých parametrů modulu mohou indikovat degradační proces dříve, než dojde k prokazatelnému snížení výkonu.

Měření výkonu modulu pomocí simulátoru (případně dalších parametrů) vyžaduje demontáž modulu, přerušování výroby na části fotovoltaického pole, odvoz modulu do specializované laboratoře a je časově i finančně náročné. Méně přesná měření charakteristik umožňují bezpečně indikovat PID při relativně vysokém stupni degradace. Podobně, termografická měření umožňují indikovat PID až při vyšší úrovni degradace modulu. Metody, umožňující indikovat PID v raném stadiu přímo v FVE, kdy je možno provádět vhodná protiopatření, jsou proto velmi žádoucí.

Velká skupina defektů se projevuje poklesem paralelního odporu modulu a tudíž stupeň degradace se dá určovat podle změn paralelního odporu, které se dají stanovit (kromě vyhodnocení V-A charakteristik získaných pomocí simulátoru) také pomocí instrumentálně méně náročných metod, jako jsou impedanční spektroskopie, nebo měření charakteristik neosvětlených článků.

Experimenty zaměřené na ověření použitelnosti impedanční spektroskopie jako diagnostické metody na fotovoltaických modulech jsou popsány v odstavci 9.1. Hlavním cílem práce bylo sledování změn V-A charakteristiky a dalších parametrů v průběhu zrychlené degradace vlivem PID pomocí několika metod spolu se sledováním možnosti regenerace modulu změnou polarizace dlouhodobě aplikovaného napětí. Výsledky tohoto experimentu jsou popsány v odstavci 9.2

9.1 Ověření použitelnosti jednotlivých metod ke studiu degradačních procesů vlivem PID

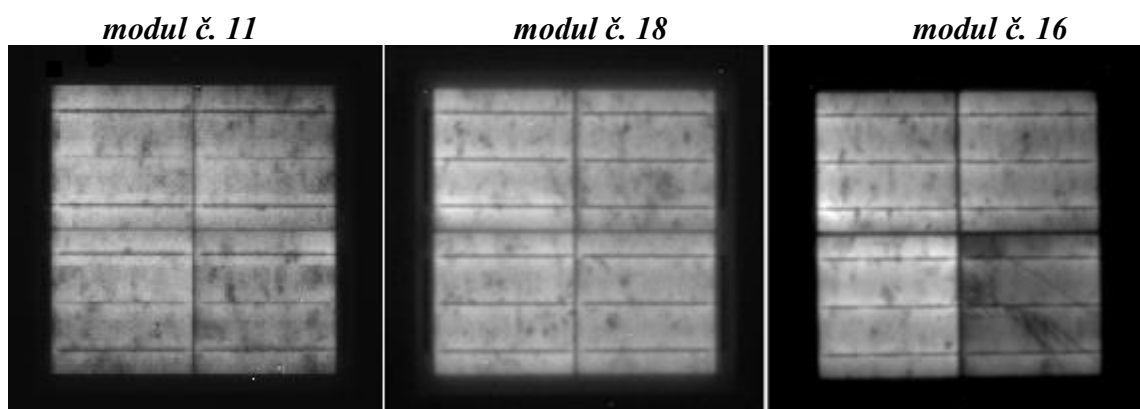
Pro ověření univerzálnosti použití IS jako diagnostické metody pro odhalení počáteční fáze PID jsme provedli experiment na malých modulech, které mají jen několik článků v sérii. Experiment jsme provedli jak pro krystalické moduly, tak i moduly a-Si.

9.1.1 Experiment

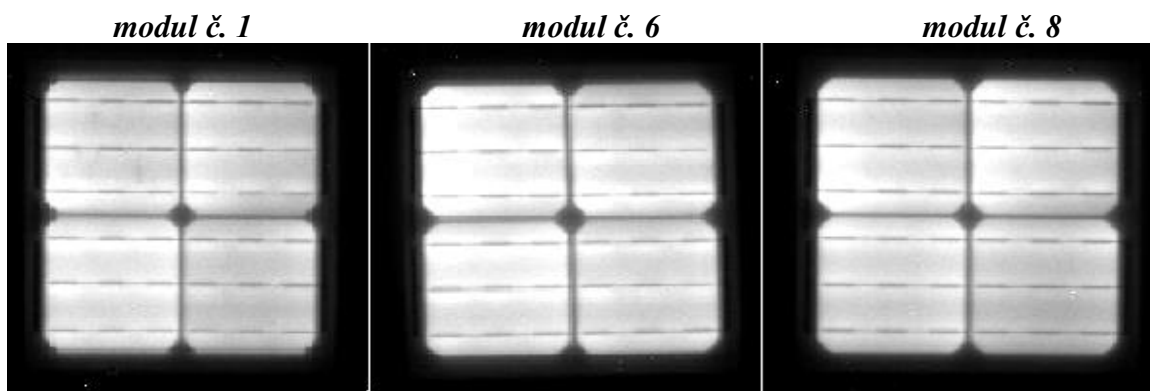
Při pokusu jsme nepoužili impedanční spektroskopii pro získání AC parametrů, ale pro vyhodnocení vad modulů. Bylo zkoumáno 10 monokrystalických a 10 multikrystalických mini modulů. Testované moduly byly zkonstruovány pouze ze 4 sériově zapojených fotovoltaických článků. Všechny moduly byly nové se stejnými parametry, konfigurace, stáří a skladovacích podmínek. V první řadě jsme provedli testování na flash testeru a zjistili aktuální výkon modulů,

dále jsme moduly testovali za použití elektroluminiscence. Pro měření impedanční spektroskopie byl použit LCR Meter HP 4284A.

Elektroluminiscence ukázala, že všechny moduly kromě jednoho jsou bez viditelných vad - viz Obr. 40. Jeden z multikrystalických fotovoltaických modulů vykazoval mikropraskliny jednoho článku. Všechny části poškozeného článku byly stále vodivě spojeny, nebylo možné pozorovat, žádné větší neaktivní části článku, které by výrazně ovlivňovaly výkon modulu, a poškození by bylo identifikovatelné již z tvaru V-A charakteristiky. Impedanční spektroskopie však ukázala významný rozdíl, který je dobře pozorovatelný z Cole-Cole diagramů.

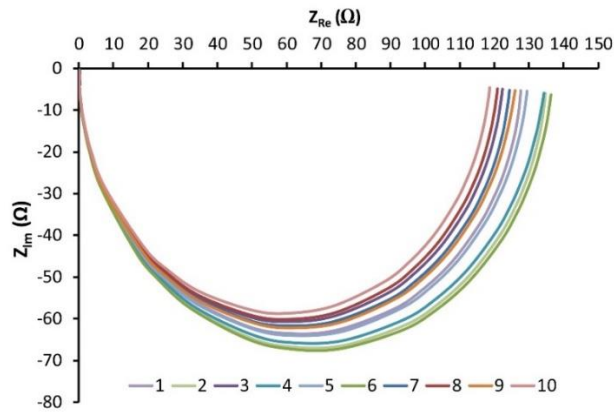


Obr. 40 Elektroluminiscence multikrystalických článků

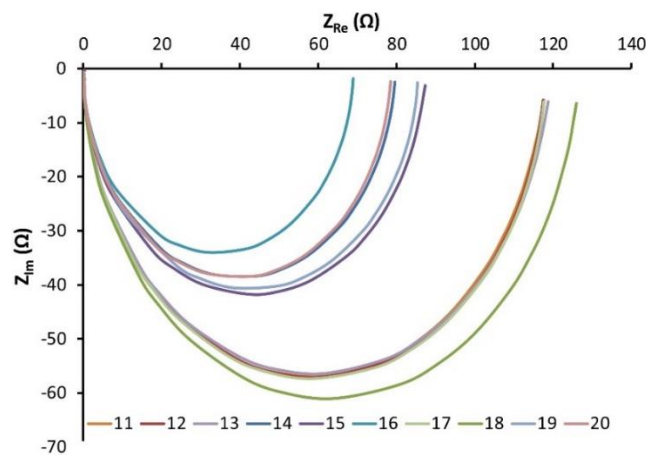


Obr. 41 Elektroluminiscence monokrystalických článků

Jak je možné vidět z Obr. 42 a Obr. 43, impedanční spektroskopie je vhodná diagnostická metoda zejména pro monokrystalické moduly. Cole-Cole diagramy monokrystalických modulů se příliš neliší a některé se prakticky dokonale překrývají. Diagramy multikrystalických modulů jsou ovlivněny různými vlastnostmi na hranách jednotlivých krystalů v použitém křemíku. Podrobněji je tato problematika diskutována v [9]

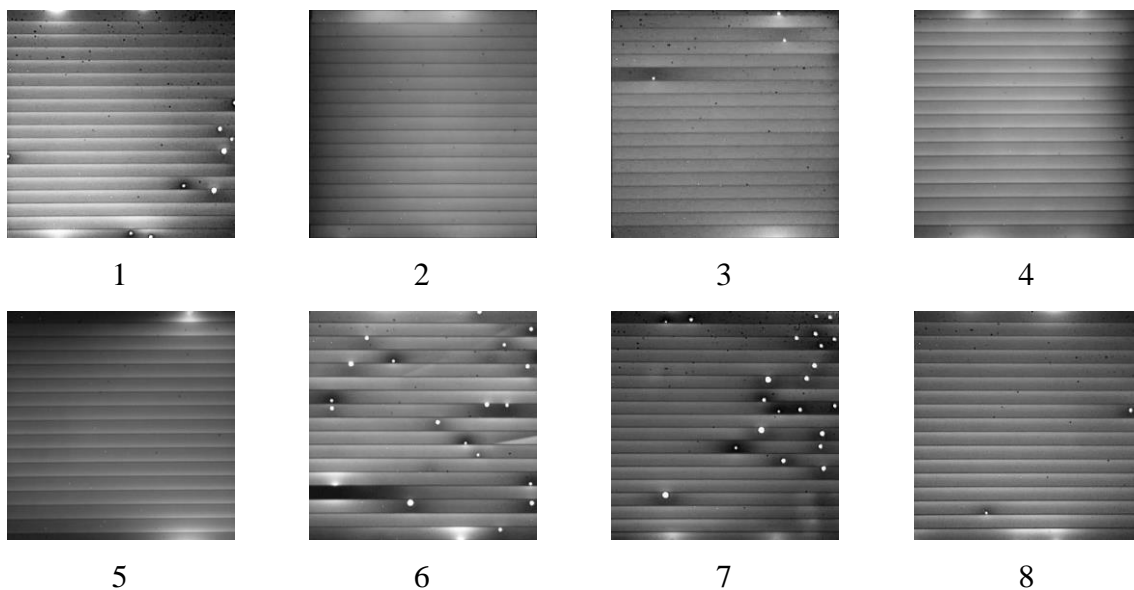


Obr. 42 Cole-Cole diagram monokrystalického modulu



Obr. 43 Cole-Cole diagram multikrystalického modulu

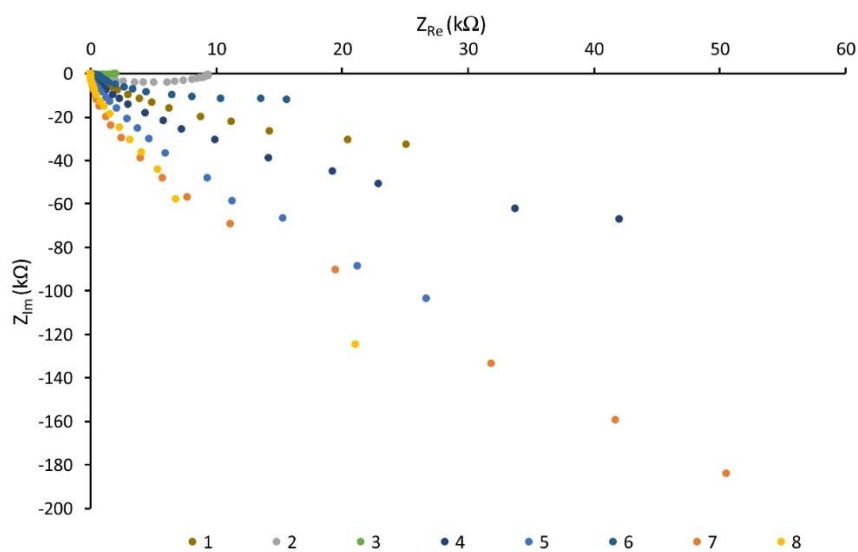
V případě použití IS na tenkovrstvých malých tandemových modulech z a-Si+ μ -Si je také možné určit míru degradace modulu reprezentovanou velikostí paralelního odporu, nicméně LCR Meter HP 4284A nemá zcela dostatečný rozsah. Další komplikací je složitost struktury, přítomnost většího množství různých defektů a nerovnoměrnost kvality absorbéru. Všechny tyto vlastnosti TF modulů vnáší do měření IS poměrně značnou nepřesnost. Experiment byl proveden na 8 kusech nových modulů. Nicméně již jak ukázala elektroluminiscence a později i měření V-A charakteristik výkon jednotlivých modulů a četnost zkratů nebyl srovnatelný.



Obr. 44 Elektroluminiscence tenkovrstvého modulu

panel č.	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	η [%]	FF [%]	P_{MAX} [W]	R_S [Ω]	R_P [Ω]
1	0,272	28,260	4,27	55,16	4,239	22,7	633,9
2	0,264	28,707	3,21	42,03	3,183	43,5	367,1
3	0,252	29,636	2,07	27,49	2,053	63,9	200,8
4	0,279	28,145	4,56	57,51	4,522	27,7	692,4
5	0,311	27,399	4,80	55,93	4,761	25,0	862,7
6	0,287	26,989	3,93	50,34	3,900	25,5	457,8
7	0,273	29,469	4,90	60,39	4,865	24,1	906,2
8	0,269	27,137	3,97	53,92	3,938	26,2	1631,7

Tabulka 5: Parametry TF modulů získané z měření VA charakteristik.



Obr. 45 Cole-Cole diagram TF modulů

Jak je zřejmé z obr. Obr. 45, u tenkovrstvých (mikromorfních) modulů se nepodařilo naměřit použitým zařízením klasické Cole-Cole diagramy, umožňující vyhodnotit prvky náhradního obvodu, zejména R_S a R_P . Není proto možné využít impedanční spektroskopii pro diagnostiku tohoto typu modulů.

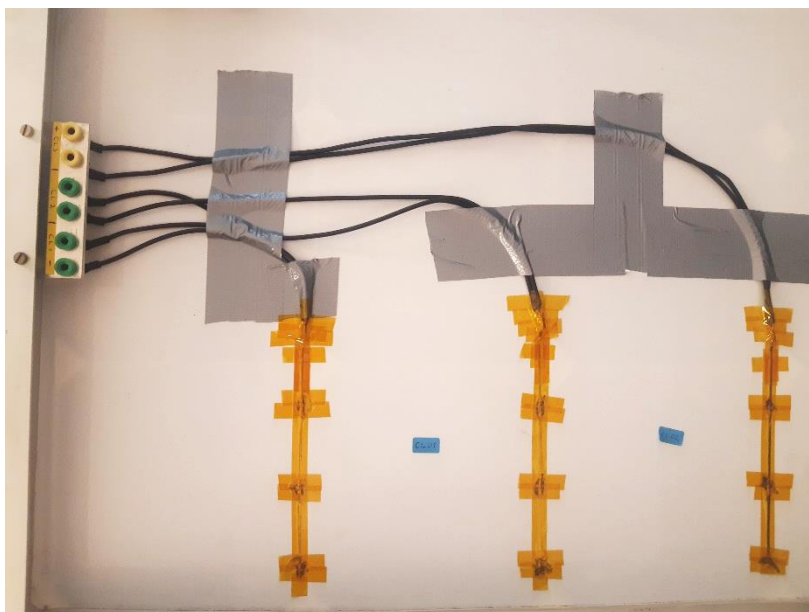
Na základě výše uvedeného experimentu, byla IS později použita k vyhodnocení vlivu PID pouze u modulů s články z krystalického křemíku. V následujícím experimentu byly projevy PID zkoumány nejen měřením V-A charakteristik a elektroluminiscence, ale byla také použita impedanční spektroskopie a měření V-A charakteristik neosvětleného modulu. Metody měření IS a měření V-A charakteristik neosvětleného modulu jsou velmi citlivé na změny paralelního odporu R_P .

9.2 Diagnostika procesu PID u fotovoltaického článku a modulu a možnosti následné regenerace

Cílem experimentu bylo sledovat proces degradace a následné regenerace pomocí několika nezávislých metod a porovnáním výsledků nalézt vhodnou metodu k indikaci počáteční fáze PID, kterou by bylo možné široce aplikovat v běžné praxi. Další částí experimentu byla studie možné regenerace při opačné polarizaci působícího napětí.

Za účelem diagnostiky potenciálem indukované degradace (PID) byly použity celkem čtyři metody a to: měření V-A charakteristik pomocí Pasa SunSim IIIc, elektroluminiscence, měření V-A charakteristik neosvětlených modulů a v neposlední řadě impedanční spektroskopie. Cílem bylo vyhodnotit vhodnost jednotlivých metod pro včasné odhalení raného stádia PID. V diagnostice fotovoltaických modulů se obvykle používají pouze první dvě metody.

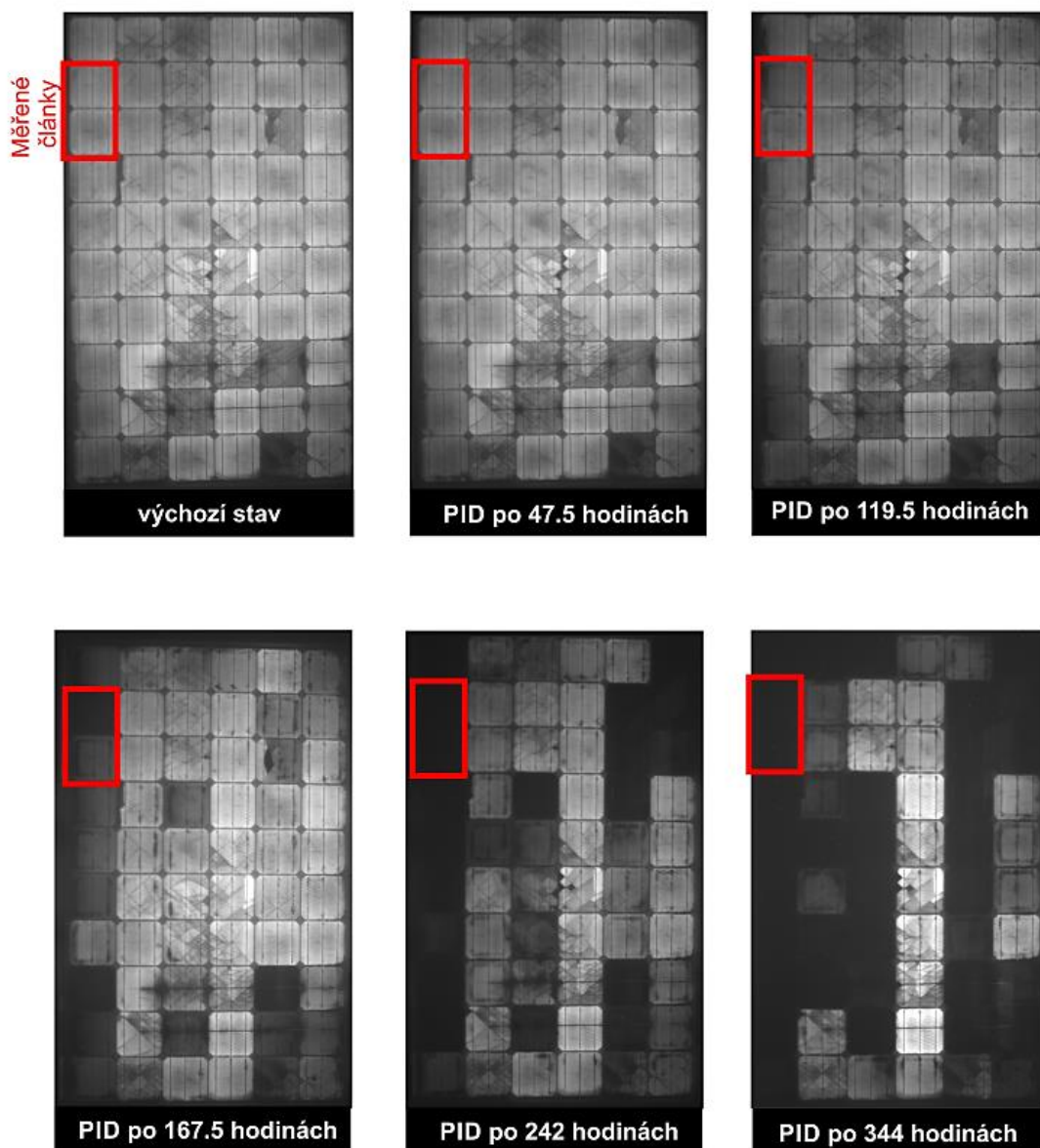
Měření byla prováděna na standardním fotovoltaickém modulu (typ SST250-60M se špičkovým výkonem $250 W_p$), který byl standardně součástí elektrárny a vystaven povětrnostním podmínkám po dobu asi 5 let. Modul byl upraven tak, aby bylo možné měřit také změny parametrů jednoho vybraného článku. Krycí fólie zadní části modulu byla lokálně odstraněna pomocí brusného kotouče a takto odkrytý článek byl následně nakontaktován přímo na bus bar, aby bylo možné čtyřbodové měření. Modifikace modulu je znázorněna na Obr. 46. Po celou dobu degrační i regenerační fáze byl modul umístěn v laboratoři s vlhkostí do 30%, takže žádné další zapouzdřovací procesy jsme neprováděli.



Obr. 46 Modifikace testovaného modulu

Degradace byla provedena pomocí zdroje vysokého napětí, napětí (715 V) bylo přivedeno na modul tak, že kladný pól byl připojen k rámu a záporný pól ke kontaktům modulu. Pro urychlení degradace nebo regenerace bylo sklo předního modulu pokryto hliníkovou fólií, která držela na modulu pouze elektrostatickou silou. Po odpojení modulu od zdroje, byl modul dvě hodiny stabilizován v laboratoři a až poté byly prováděny jednotlivé diagnostické metody. Po měření pokračovala degradace ve stejném experimentálním uspořádání. Celková doba degradace byla 344 hodin. Následná regenerace modulu probíhala ve stejném uspořádání, pouze s obrácenou polaritou.

Jako první diagnostická metoda byla použita elektroluminiscence. Na snímcích je možné pozorovat určitou změnu intenzity záření v případě, že modul je již poměrně značně degradovaný. Elektroluminiscence však není vhodná pro včasnou diagnostiku a její použití v terénu je problematické. Kvantifikace elektroluminiscenčních obrazů je sice určitým způsobem možná, ale je poměrně komplikovaná [91].

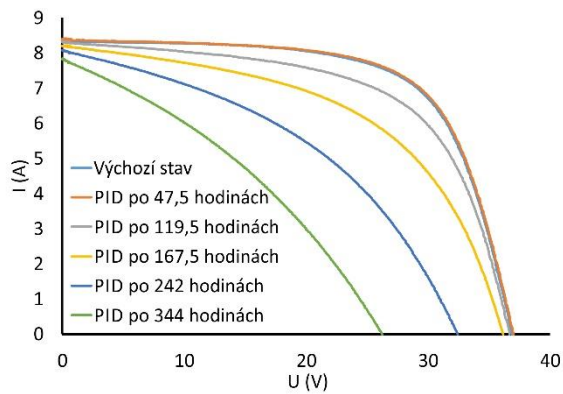


Obr. 47 Elektroluminiscenční snímky v průběhu degradace

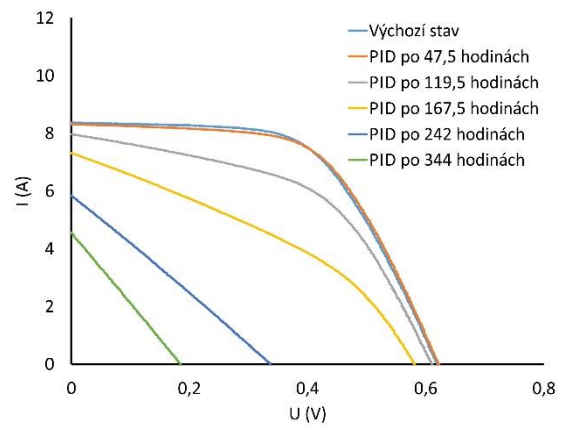
9.2.1 Proces degradace

Volt-Ampérová charakteristika získaná během degradace modulu je znázorněna na Obr. 48 a). Po téměř 50 hodinách, nelze zaznamenat jakoukoliv změnu charakteristiky ani výkonu. S postupující degradací se charakteristika zplošťuje a klesá jak výkon modulu, tak se rovněž snižuje napětí U_{OC} . Průběh degradace byl také sledován impedanční spektroskopií a měření neosvětlených V-A charakteristik. Impedanční spektroskopie se ukázala jako vhodná a citlivá metoda pro počáteční fázi degradace. Cole-Cole diagramy pro degradaci modulu jsou znázorněny na Obr. 48 b). Měření bylo také provedeno na jednotlivých článcích zkoumaného modulu (Obr. 49 a-Obr. 49 c). V případě IS (Obr. 49 b) bylo z měření provedených na

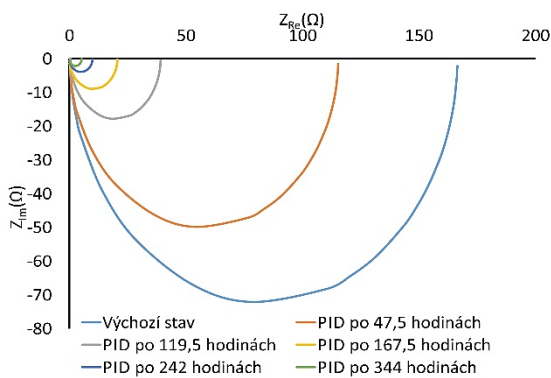
vybraném článku možné zaznamenat pouze tři křivky, protože při pokračující degradaci článek zcela ztratil svůj kapacitní charakter. Degradace však nadále probíhala dalších téměř 200 hodin.



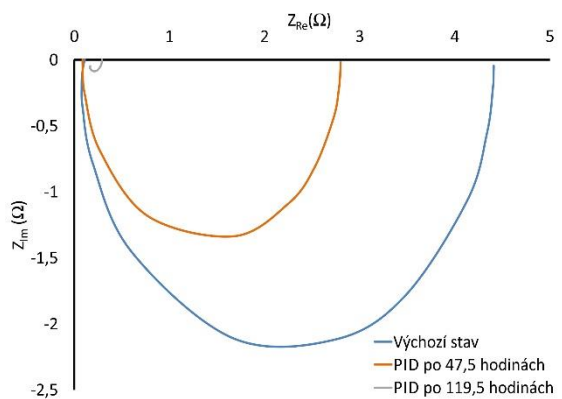
Obr. 48 a): V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV modul



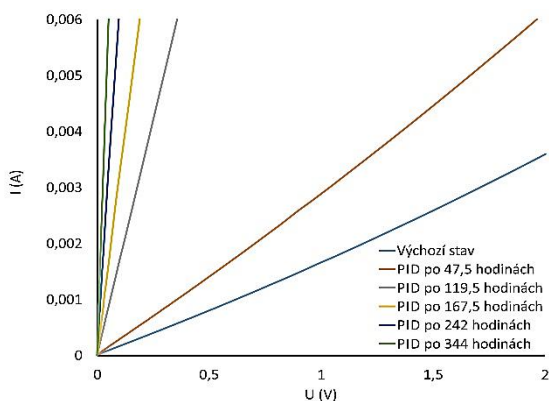
Obr. 49 a): V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV článek



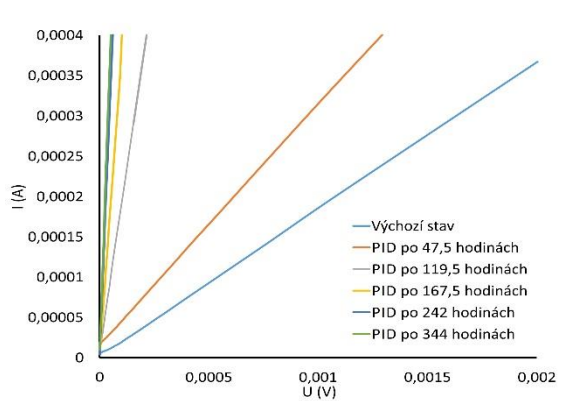
Obr. 48 b): Cole-Cole diagram během degradace pro FV modul



Obr. 49 b): Cole-Cole diagram během degradace pro FV článek



Obr. 48 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV modul

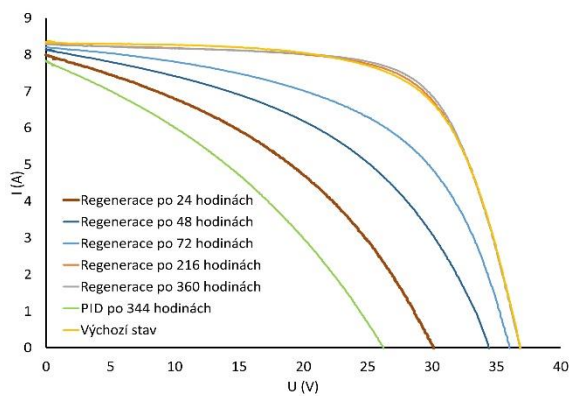


Obr. 49 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu degradace pro FV článek

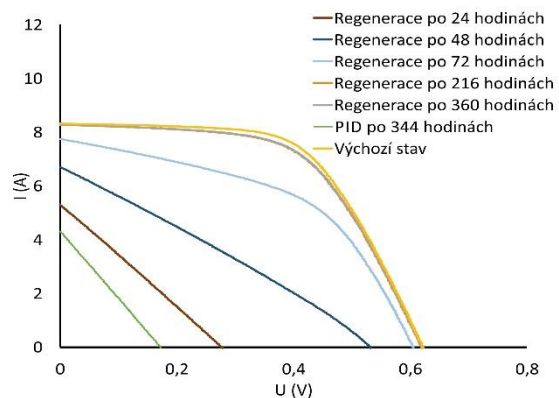
9.2.2 Proces regenerace

Regenerace modulu, degradovaného procesem, popsaným v odstavci 9.2.1, byla provedena ve stejném experimentálním uspořádání změnou polarity napájecího napětí.

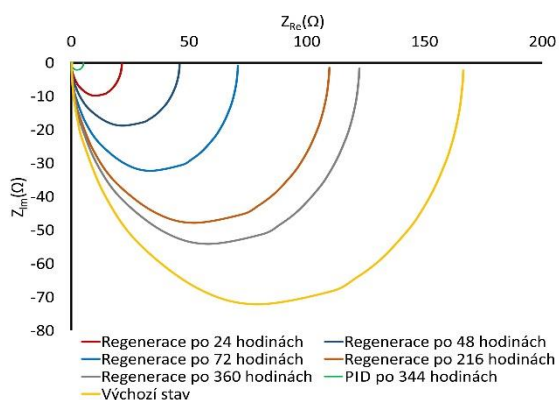
Charakteristiky získané během regenerace modulu jsou znázorněny na Obr. 50 a)-Obr. 50 c). Regenerace PID probíhala velmi rychle a poslední dvě měřené charakteristiky se překrývají s charakteristikami výchozího měření modulu nezasaženého degradací. V případě celého modulu bylo dosaženo ještě vyššího výkonu, než měl modul v původním stavu před degradací. Je však důležité si uvědomit, že některé parametry se nevrátily na původní hodnotu, zejména paralelní odpor R_P , který je velmi citlivým ukazatelem degradace jak článků, tak i modulů. Podobné výsledky byly také měřeny pro jednotlivé články (Obr. 51 a - Obr. 51 c). U jednotlivého článku, se však nepodařilo dosáhnout původního výkonu ani po 360 hodinách regenerace. Cole-Cole diagram jednoho článku (Obr. 51b) ukazuje, že již po prvních 24 hodinách regenerace se článek opět choval jako kapacitní člen.



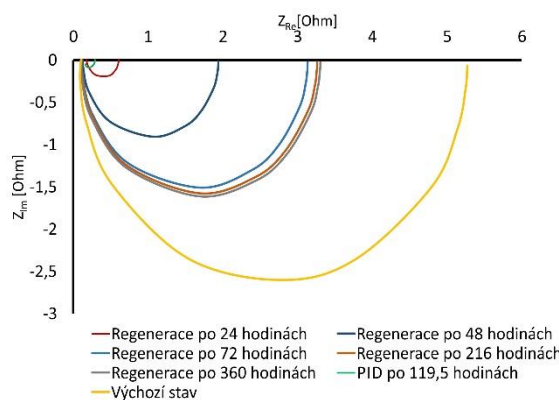
Obr. 50 a): V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV modul



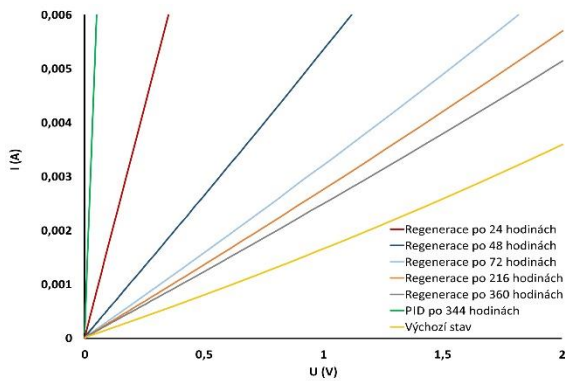
Obr. 51 a): V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV článek



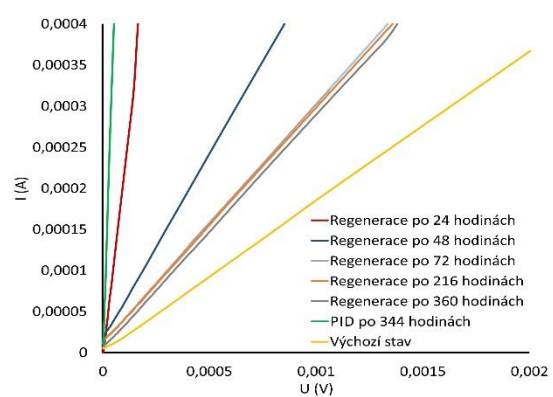
Obr. 50 b): Cole-Cole diagram během regenerace pro FV modul



Obr. 51 b): Cole-Cole diagram během regenerace pro FV článek



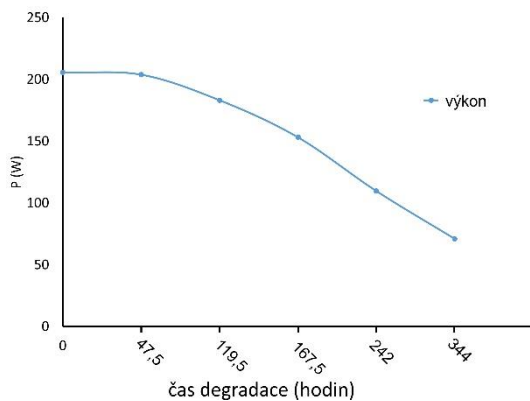
Obr. 50 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV modul



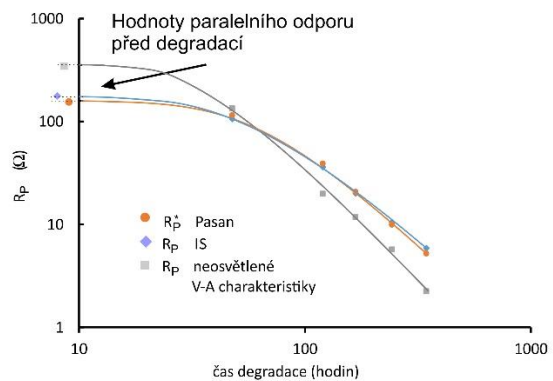
Obr. 51 c): neosvětlené V-A charakteristiky v průběhu regenerace pro FV článek

9.2.3 Vyhodnocení použitých metod

Změna paralelního odporu se jeví jako parametr nejrychleji indikující PID. Po méně než 100 hodinách degradace prakticky nelze zaznamenat jakoukoliv změnu výkonu, zatímco významné snížení paralelního odporu je možné pozorovat již po méně než 50 hodinách degradace. Průběh poklesu výkonu je znázorněn na Obr. 52. Průběh změn paralelního odporu R_P je znázorněn na Obr. 53, hodnoty R_P^* odvozené z V-A charakteristiky (flash tester) byly získány derivací krajních podmínek, hodnoty R_P získané z měření neosvětlených V - A charakteristik byly odhadnuty na základě rovnice 8.8.



Obr. 52 Změna výkonu modulu v průběhu degradace



Obr. 53 Změna R_P v průběhu degradace

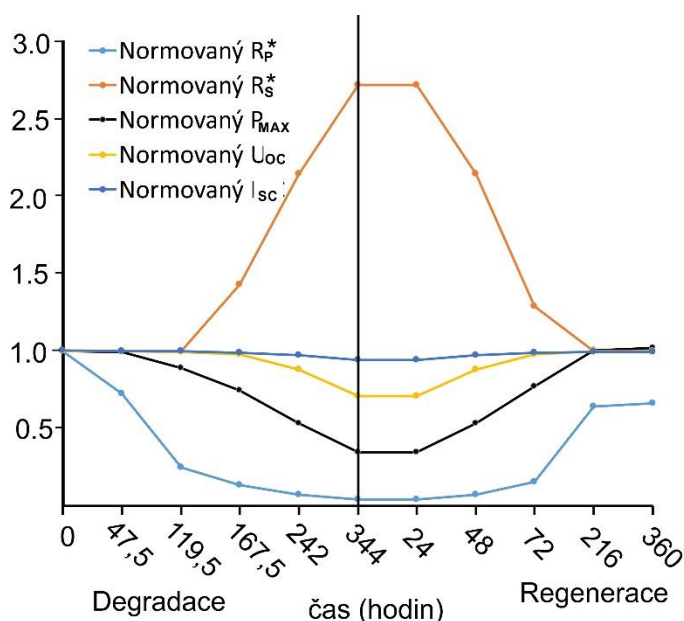
Diagnostická metoda využívající měření neosvětlených V-A charakteristik se ukázala jako nejcitlivější, výsledky impedanční spektroskopie a flash testu se dají považovat za srovnatelné, pokud jde o stanovení paralelního odporu. Odhadovaná hodnota R_P^* při použití flash testu a rovnice (4.36) se snížila o 27% během prvních 47,5 hodin, v případě IS o 30% a v případě měření neosvětlených V-A charakteristik a rovnice (8.9) dokonce o 57 %. V prvních desítkách

hodin degradace se zdá, že závislost R_P na době degradace je lineární a postupně se mění v mocninnou funkci.

Relativní změny jednotlivých parametrů fotovoltaického modulu, měřené pomocí Pasan SunSim IIIc, během degradace a následné regenerace jsou znázorněny na Obr. 54.

Ze změn parametrů je zřejmé, že PID má nejdříve vliv na pokles paralelního odporu R_P^* , a teprve později dojde ke snížení výkonu. Ke zvýšení sériového odporu R_S^* a snížení U_{OC} dochází pouze v relativně pokročilém stadiu degradace. Jak ukázala analýza problematiky vyhodnocování parazitních odporů ze směrnic V-A charakteristiky, provedená v odstavci 4.4.6, nárůst R_S^* při vysokém stupni PID je důsledkem ovlivnění směrnice VA charakteristiky v bodě U_{OC} výrazným poklesem R_P^* .

Parametry jako je výkon, U_{OC} , I_{SC} , R_S^* se vrátily na své původní hodnoty po 360 hodinách regenerace, pouze hodnota R_P^* vykazuje určitou hysterezi a nevrátila se na původní hodnotu. Tato degradace hodnoty R_P^* však ještě neovlivnila výkon modulu, ale vykazuje určitou nevratnost PID.



Obr. 54 Vývoj parametrů FV modulu během degradace a následné regenerace

9.2.4 Závěr

Na základě měření dat FV modulu během PID bylo zjištěno, že paralelní odpor R_P je nejcitlivějším indikátorem v počáteční fázi PID. Významné snížení odporu R_P ve srovnání s původní hodnotou se projeví ještě před 1% poklesem výkonu.

Porovnání změn jednotlivých parametrů během degradačního procesu ukazuje, že monitorováním R_P umožňuje detekovat počáteční fáze PID pomocí jednoduchých metod, jako

je měření neosvětlených V-A charakteristik nebo impedanční spektroskopie, které se ukázaly jako dostatečně citlivé a spolehlivé metody. Požadované měřicí zařízení je relativně levné a na rozdíl od elektroluminiscence nebo měření V-A charakteristik pomocí solárního simulátoru není nutné moduly demontovat a transportovat je do laboratoře.

Dalším výsledkem experimentu je zjištění, že pomocí dlouhodobé změny polarity působícího napětí je možno modul regenerovat, zejména z hlediska maximálního výkonu za STC. Nicméně, určitý stupeň degradace přetrvává, protože po cyklu degradace – regenerace zůstává hodnota R_p snižená oproti výchozímu stavu.

10 Závěr

Disertační práce předkládá výsledky nedestruktivních diagnostických metod vhodných pro fotovoltaické články a moduly. Ukázalo se, že většina poruch a defektů fotovoltaických článků a modulů má nemalý vliv na pokles paralelního odporu R_p . Byl publikován seznam nejčastěji se vyskytujících defektů a poruch modulů. Pro charakterizaci defektů byla použita sada metod založených na principu detekce emitovaného záření nebo na vyhodnocování změn elektrických parametrů, zejména pak na změně impedance (a tím i R_p). Výsledky metod bylo v mnoha případech nutné kombinovat, aby byla možná jejich následná korelace a interpretace. Během studia bylo publikováno několik vědeckých prací zaměřených na diagnostiku fotovoltaických článků a modulů. Jejich seznam je uveden na konci této práce. Cílem této práce bylo najít korelaci mezi běžnými a novými metodami a identifikovat omezení diagnostických metod. Bylo provedeno srovnání mezi impedanční spektroskopií (IS), měření VA charakteristik pomocí flash testeru, elektroluminiscencí a měřením VA charakteristik neosvětleného modulu. Byla zjištěna silná korelace mezi těmito metodami a byly popsány pokyny pro úspěšné využívání IS a její omezení a komplikace při použití IS pro tenkovrstvé moduly.

Byla popsána problematika určení sériového a paralelního odporu, jejich závislost na ozáření a nepřesnosti v případě definování pomocí směrnice tečny v krajních bodech VA charakteristiky. Tato závislost je obvykle zanedbávána a získané hodnoty parazitních odporů jsou pak zatíženy systematickou chybou zejména při nízké ozáření. Znalost této závislosti je nezbytná pro správné vyhodnocení změny paralelního odporu, který IS využívá jako hlavní indikátor degradace. Zároveň byla prokázána vysoká citlivost jednoduché metody měření VA charakteristik neosvětlených modulů, kterou je možno aplikovat ve fotovoltaických elektrárnách bez demontáže modulů z konstrukcí. Metodu lze případně zahrnout do monitoringu FVE.

Výsledky porovnání citlivosti jednotlivých diagnostických metod byly prezentovány na vědeckých konferencích a vybrané výsledky diagnostiky modulů byly publikovány v impaktovaném časopise. Cíle disertační práce byly splněny, nicméně problematika nedestruktivních diagnostických metod není uzavřena a je vhodné se nedestruktivní diagnostikou dále zabývat.

10.1 Možnosti dalšího výzkumu

Prezentované výsledky nejen rozšiřují znalosti a možnosti nedestruktivní diagnostiky fotovoltaických článků a modulů, ale také poukazují na stále neobjasněné problémy, jako je absence přesného stanovení parazitních odporů a korelace mezi výkonem modulu a změnami

hodnot parazitních odporů. Další perspektivní oblastí by mohlo být využití opticko-elektrických metod. Velmi zajímavé se jeví měření spekter vyzařování jednotlivých defektů a využití citlivé lock-in termografie.

11 Reference

- [1] D. C. Jordan a S. R. Kurtz, „Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review: Photovoltaic degradation rates“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, roč. 21, č. 1, s. 12–29, led. 2013, doi: 10.1002/pip.1182.
- [2] Bruno Burger, Klaus Kiefer, Christoph Kost³, Sebastian Nold, a Simon Philipps, „Photovoltaic report“. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, 2020, [Online]. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>.
- [3] V. Benda, „Photovoltaics: The Basics“, in *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, Elsevier, 2018, s. 151–179.
- [4] V. Benda, „Crystalline Silicon Solar Cell and Module Technology“, in *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, Elsevier, 2018, s. 181–213.
- [5] T. M. Letcher a V. M. Fthenakis, Ed., *A comprehensive guide to solar energy systems: with special focus on photovoltaic systems*. London, United Kingdom ; San Diego, CA, United States ; Cambridge, MA, United States ; Kidlington, Oxford, United Kingdom: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2018.
- [6] A. Izadian, A. Pourtaherian, a S. Motahari, „Basic model and governing equation of solar cells used in power and control applications“, in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, USA, zář. 2012, s. 1483–1488, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342639.
- [7] N. M. A. Alrahim Shannan, N. Z. Yahaya, a B. Singh, „Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison“, in *2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, Penang, Malaysia, lis. 2013, s. 210–214, doi: 10.1109/ICCSCE.2013.6719960.
- [8] J. Johnson, D. Schoenwald, S. Kuszmaul, J. Strauch, a W. Bower, „Creating dynamic equivalent PV circuit models with impedance spectroscopy for arc fault modeling“, in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA, čer. 2011, s. 002328–002333, doi: 10.1109/PVSC.2011.6186419.
- [9] L. Cerná, T. Finsterle, P. Hrzina, a V. Benda, „Impedance Spectroscopy and Its Possible Use for Defects Detection“, *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1842-1845*, s. 4 pages, 5928 kb, 2016, doi: 10.4229/EUPVSEC20162016-5BV.1.16.
- [10] Michal Horák, „Mikroelektronické prvky a struktury“. Vysoké učení technické v Brně, 2011, [Online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3953478-Rndr-michal-horak-csc-mikroelektronicke-prvky-a-struktury.html>.
- [11] M. L. Lucia, J. L. Hernandez-Rojas, C. Leon, a I. Mártel, „Capacitance measurements of p-n junctions: depletion layer and diffusion capacitance contributions“, *Eur. J. Phys.*, roč. 14, č. 2, s. 86–89, bře. 1993, doi: 10.1088/0143-0807/14/2/009.
- [12] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S. P. Nehra, a M. S. Dhaka, „A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature“, *Energy Reports*, roč. 1, s. 104–109, lis. 2015, doi: 10.1016/j.egy.2015.03.004.
- [13] M. K. El-Adawi a I. A. Al-Nuaim, „A method to determine the solar cell series resistance from a single I–V. Characteristic curve considering its shunt resistance—new

- approach", *Vacuum*, roč. 64, č. 1, s. 33–36, lis. 2001, doi: 10.1016/S0042-207X(01)00370-0.
- [14] Vitezslav Benda a Zdenek Machacek, „A note on parameters of photovoltaic cells in dependence on irradiance and temperature", Agia Napa, Cyprus, lis. 2010, roč. 7.
- [15] A. Goetzberger, J. Knobloch, a B. Voß, *Crystalline Silicon Solar Cells: Goetzberger/Crystalline Silicon Solar Cells*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [16] A. Goetzberger, J. Knobloch, B. Voss, a R. Waddington, *Crystalline silicon solar cells*. Chichester: Wiley, 1998.
- [17] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, a Syafaruddin, „Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model", *Simulation Modelling Practice and Theory*, roč. 19, č. 7, s. 1613–1626, srp. 2011, doi: 10.1016/j.simpat.2011.04.005.
- [18] D. L. Bätzner, A. Romeo, H. Zogg, a A. N. Tiwari, „CdTe/CdS SOLAR CELL PERFORMANCE UNDER LOW IRRADIANCE", Munich, roč. October 2001.
- [19] C. S. Ruschel, F. P. Gasparin, E. R. Costa, a A. Krenzinger, „Assessment of PV modules shunt resistance dependence on solar irradiance", *Solar Energy*, roč. 133, s. 35–43, srp. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.047.
- [20] S. Kaplanis a E. Kaplani, Ed., *Renewable energy systems: theory, innovations, and intelligent applications*. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, Inc, 2013.
- [21] A. Luque a S. Hegedus, Ed., *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley, 2011.
- [22] T. Markvart, Ed., *Solar cells: materials, manufacture and operation*, Reprint. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2006.
- [23] V. Benda, „Photovoltaics, Including New Technologies (Thin Film) and a Discussion on Module Efficiency", in *Future Energy*, Elsevier, 2020, s. 375–412.
- [24] A. Kumar a S. N. Melkote, „Diamond Wire Sawing of Solar Silicon Wafers: A Sustainable Manufacturing Alternative to Loose Abrasive Slurry Sawing", *Procedia Manufacturing*, roč. 21, s. 549–566, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.156.
- [25] S. Braun, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch, a D. Habermann, „The Multi-busbar Design: An Overview", *Energy Procedia*, roč. 43, s. 86–92, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.11.092.
- [26] A. Goodrich *et al.*, „A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 114, s. 110–135, čvc. 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2013.01.030.
- [27] W. Cai *et al.*, „22.2% Efficiency n-type PERT Solar Cell", *Energy Procedia*, roč. 92, s. 399–403, srp. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.07.119.
- [28] S. W. Glunz *et al.*, „The Irresistible Charm of a Simple Current Flow Pattern – 25% with a Solar Cell Featuring a Full-Area Back Contact", *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 259-263*, s. 5 pages, 5146 kb, 2015, doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-2BP.1.1.
- [29] T. NATO Advanced Study Institute on Photovoltaic and Photoactive Materials-- Properties and Applications, J. M. Marshall, a D. Dimova-Malinovska, *Photovoltaic and photoactive materials-- Properties, technology and applications: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Photovoltaic and Photoactive Materials -- Properties, Technology and Applications Sozopol, Bulgaria, from 9-21 September 2001*. Dordrecht: Springer, 2002.
- [30] *FUTURE ENERGY: improved, sustainable and clean options for our planet*. Place of publication not identified: ELSEVIER, 2020.

- [31] H. Gong, G. Wang, L. Zheng, a M. Gao, „Reliability and Durability Impact of High UV Transmission EVA for PV Modules", *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 2061-2065*, s. 5 pages, 7035 kb, 2015, doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-5AV.6.45.
- [32] K. J. Geretschläger, G. M. Wallner, a J. Fischer, „Structure and basic properties of photovoltaic module backsheet films", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 144, s. 451–456, led. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.09.060.
- [33] B. Adothu *et al.*, „Newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant—A potential candidate for crystalline silicon photovoltaic modules encapsulation", *Solar Energy*, roč. 194, s. 581–588, pro. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.11.018.
- [34] M. Mittag *et al.*, „Thermal Modelling of Photovoltaic Modules in Operation and Production", *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 892-900*, s. 9 pages, 9134 kb, 2019, doi: 10.4229/EUPVSEC20192019-4CO.2.4.
- [35] M. Pagliaro, G. Palmisano, a R. Ciriminna, *Flexible Solar Cells*, 1. vyd. Wiley, 2008.
- [36] T. Nakada, T. Kuraishi, T. Inoue, a T. Mise, „CIGS thin film solar cells on polyimide foils", in *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, HI, USA, čer. 2010, s. 000330–000334, doi: 10.1109/PVSC.2010.5615947.
- [37] M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K. A. Berger, a K. Kato, *Performance and reliability of photovoltaic systems: subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules: IEA PVPS task 13: external final report IEA-PVPS*. Sankt Ursen: International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme, 2014.
- [38] K. Bothe a J. Schmidt, „Electronically activated boron-oxygen-related recombination centers in crystalline silicon", *Journal of Applied Physics*, roč. 99, č. 1, s. 013701, led. 2006, doi: 10.1063/1.2140584.
- [39] V. Poulek *et al.*, „PV Panel and PV Inverter Damages Caused by Combination of Edge Delamination, Water Penetration, and High String Voltage in Moderate Climate", *IEEE J. Photovoltaics*, s. 1–5, 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2021.3050984.
- [40] M.-H. Du a S. B. Zhang, „Topological defects and the Staebler-Wronski effect in hydrogenated amorphous silicon", *Appl. Phys. Lett.*, roč. 87, č. 19, s. 191903, lis. 2005, doi: 10.1063/1.2130381.
- [41] A. Romeo *et al.*, „Development of thin-film Cu(In,Ga)Se₂ and CdTe solar cells", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, roč. 12, č. 23, s. 93–111, bř. 2004, doi: 10.1002/pip.527.
- [42] R. A. Sasala, R. C. Powell, G. L. Dorer, a N. Reiter, „Recent progress in CdTe solar cell research at SCI", in *AIP Conference Proceedings*, Lakewood, Colorado (USA), 1997, roč. 394, s. 171–186, doi: 10.1063/1.52895.
- [43] R. A. Sasala a J. R. Sites, „Time dependent voltage in CuInSe₂/sub 2/ and CdTe solar cells", in *Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1993 (Cat. No.93CH3283-9)*, Louisville, KY, USA, 1993, s. 543–548, doi: 10.1109/PVSC.1993.347036.
- [44] M. Gostein a L. Dunn, „Light soaking effects on photovoltaic modules: Overview and literature review", in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA, čer. 2011, s. 003126–003131, doi: 10.1109/PVSC.2011.6186605.
- [45] S. Demtsu, S. Bansal, a D. Albin, „Intrinsic stability of thin-film CdS/CdTe modules", in *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, HI, USA, čer. 2010, s. 001161–001165, doi: 10.1109/PVSC.2010.5614753.
- [46] A. O. Pudov *et al.*, „Effect of back-contact copper concentration on CdTe cell operation", in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.*, New Orleans, LA, USA, 2002, s. 760–763, doi: 10.1109/PVSC.2002.1190676.

- [47] C. Corwine, „Copper inclusion and migration from the back contact in CdTe solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, bř. 2004, doi: 10.1016/j.solmat.2004.02.005.
- [48] F. Engelhardt, M. Schmidt, Th. Meyer, O. Seifert, J. Parisi, a U. Rau, „Metastable electrical transport in Cu(In,Ga)Se₂ thin films and ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ heterostructures", *Physics Letters A*, roč. 245, č. 5, s. 489–493, srp. 1998, doi: 10.1016/S0375-9601(98)00401-0.
- [49] U. Rau, M. Schmitt, J. Parisi, W. Riedl, a F. Karg, „Persistent photoconductivity in Cu(In,Ga)Se₂ heterojunctions and thin films prepared by sequential deposition", *Appl. Phys. Lett.*, roč. 73, č. 2, s. 223–225, čvc. 1998, doi: 10.1063/1.121762.
- [50] S. Lany a A. Zunger, „Light- and bias-induced metastabilities in Cu(In,Ga)Se₂ based solar cells caused by the (V_{Se}-V_{Cu}) vacancy complex", *J. Appl. Phys.*, roč. 100, č. 11, s. 113725, 2006, doi: 10.1063/1.2388256.
- [51] A. R. Hoffman a R. G. Ross, „Testing of Terrestrial Solar Cell Modules".
- [52] W. Lu, Z. Wang, a H. Hu, „Polarization effects and tests for crystalline silicon solar cells", *J. Semicond.*, roč. 36, č. 9, s. 092002, zář. 2015, doi: 10.1088/1674-4926/36/9/092002.
- [53] U. K. Das *et al.*, „Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 81, s. 912–928, led. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.017.
- [54] A. Livera, M. Theristis, G. Makrides, a G. E. Georghiou, „Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems", *Renewable Energy*, roč. 133, s. 126–143, dub. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.101.
- [55] European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Ed., *EU PVSEC 2019 proceedings: 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, the most inspiring platform for the global PV solar sector, 09-13 September 2019, Marseille, France*. 2019.
- [56] International Electrotechnical Commission, International Electrotechnical Commission, a Technical Committee 82, *Photovoltaic (PV) modules: test methods for the detection of potential-induced degradation. Part 1, Part 1*, 2015.
- [57] „IEC 62804".
- [58] U. K. Das *et al.*, „Forecasting of photovoltaic power generation and model optimization: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 81, s. 912–928, led. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.017.
- [59] T. Kaden, K. Lammers, a H. J. Möller, „Power loss prognosis from thermographic images of PID affected silicon solar modules", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 142, s. 24–28, lis. 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2015.05.028.
- [60] P. Cotfas, D. Cotfas, P. Borza, D. Sera, a R. Teodorescu, „Solar Cell Capacitance Determination Based on an RLC Resonant Circuit", *Energies*, roč. 11, č. 3, s. 672, bř. 2018, doi: 10.3390/en11030672.
- [61] M. Florides, G. Makrides, a G. E. Georghiou, „Early Potential Induced Degradation (PID) Detection in the Field: Solar Cell Shunt Resistance Measurement at Different Bias Conditions", *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1157-1160*, s. 4 pages, 6005 kb, 2018, doi: 10.4229/35THEUPVSEC20182018-5CV.1.6.
- [62] M. Schwark *et al.*, „Investigation of potential induced degradation (PID) of solar modules from different manufacturers", in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, Austria, lis. 2013, s. 8090–8097, doi: 10.1109/IECON.2013.6700486.
- [63] S. Spataru, P. Hacke, D. Sera, C. Packard, T. Kerekes, a R. Teodorescu, „Temperature-dependency analysis and correction methods of *in situ* power-loss estimation for crystalline

- silicon modules undergoing potential-induced degradation stress testing: Temperature-dependency analysis and correction methods", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, roč. 23, č. 11, s. 1536–1549, lis. 2015, doi: 10.1002/pip.2587.
- [64] P. Hacke, K. Terwilliger, a S. Kurtz, „In-Situ Measurement of Crystalline Silicon Modules Undergoing Potential-Induced Degradation in Damp Heat Stress Testing for Estimation of Low-Light Power Performance". National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [65] W. Luo *et al.*, „Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review", *Energy Environ. Sci.*, roč. 10, č. 1, s. 43–68, 2017, doi: 10.1039/C6EE02271E.
- [66] M. Bähr a K. Lauer, „Analysis of Activation Energies and Decay-time Constants of Potential-induced Degraded Crystalline Silicon Solar Cells", *Energy Procedia*, roč. 77, s. 2–7, srp. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.002.
- [67] A. Masuda, Y. Hara, a S. Jonai, „Consideration on Na diffusion and recovery phenomena in potential-induced degradation for crystalline Si photovoltaic modules", *Jpn. J. Appl. Phys.*, roč. 55, č. 2S, s. 02BF10, úno. 2016, doi: 10.7567/JJAP.55.02BF10.
- [68] G. Mon, L. Wen, J. Meyer, R. Ross, a A. Nelson, „Electrochemical and galvanic corrosion effects in thin-film photovoltaic modules", in *Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Las Vegas, NV, USA, 1988, s. 108–113 roč.1, doi: 10.1109/PVSC.1988.105667.
- [69] U. K. Krieger a W. A. Lanford, „Field assisted transport of Na⁺ ions, Ca²⁺ ions and electrons in commercial soda-lime glass I: Experimental", *Journal of Non-Crystalline Solids*, roč. 102, č. 1–3, s. 50–61, čer. 1988, doi: 10.1016/0022-3093(88)90112-3.
- [70] S. Pingel *et al.*, „Potential Induced Degradation of solar cells and panels", in *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, HI, USA, čer. 2010, s. 002817–002822, doi: 10.1109/PVSC.2010.5616823.
- [71] V. Naumann *et al.*, „The role of stacking faults for the formation of shunts during potential-induced degradation of crystalline Si solar cells", *Phys. Status Solidi RRL*, roč. 7, č. 5, s. 315–318, kvě. 2013, doi: 10.1002/psr.201307090.
- [72] V. Naumann *et al.*, „Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 120, s. 383–389, led. 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2013.06.015.
- [73] D. Lausch *et al.*, „Potential-Induced Degradation (PID): Introduction of a Novel Test Approach and Explanation of Increased Depletion Region Recombination", *IEEE J. Photovoltaics*, roč. 4, č. 3, s. 834–840, kvě. 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2300238.
- [74] M. Frazão, J. A. Silva, K. Lobato, a J. M. Serra, „Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera", *Measurement*, roč. 99, s. 7–12, bře. 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2016.12.017.
- [75] T. Weber, J. Berghold, F. Heilmann, M. Roericht, S. Krauter, a P. Grunow, „Test Sequence Development for Evaluation of Potential Induced Degradation on Thin-Film Modules", *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 3324-3331*, s. 8 pages, 10729 kb, 2013, doi: 10.4229/28THEUPVSEC2013-4AV.5.46.
- [76] B. Trautmann, V. Wesselak, P. Manz, S. Voswinckel, E. Fokuhl, a C. Schmidt, „Leakage Currents Behaviour of $\mu\text{C-Si}$ PV-Modules Regarding Temperature and Relative Humidity", *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 3339-3342*, s. 4 pages, 4003 kb, 2014, doi: 10.4229/EUPVSEC20142014-5DV.3.3.
- [77] T. Weber, E. Benfares, S. Krauter, a P. Grunow, „Electroluminescence on the TCO Corrosion of Thin Film Modules", *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, roč. 6-10 September 2010, s. 5 pages, 4546 kb, 2010, doi: 10.4229/25THEUPVSEC2010-3AV.2.9.

- [78] E. Annigoni, A. Virtuani, F. Sculati-Meillaud, a C. Ballif, „Modeling Potential-Induced Degradation (PID) of Field-Exposed Crystalline Silicon Solar PV Modules: Focus on a Regeneration Term", in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, čer. 2017, s. 2794–2798, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366733.
- [79] ČSN EN 61215-2 *Zemské fotovoltaické (PV) moduly - Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu - Část 2: Zkušební postupy*. .
- [80] ČSN EN 61646 (364630) *Tenkovrstvé fotovoltaické (FV) moduly pro pozemní použití - Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu*. .
- [81] M. Herman, M. Jankovec, a M. Topič, „Optimal I-V Curve Scan Time of Solar Cells and Modules in Light of Irradiance Level", *International Journal of Photoenergy*, roč. 2012, s. 1–11, 2012, doi: 10.1155/2012/151452.
- [82] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy, *Guidelines for PV power measurement in industry*. LU: Publications Office, 2010.
- [83] L. Cerná, T. Finsterle, P. Hrzina, a V. Benda, „A Simple Method of Evaluating Thermograms of Photovoltaic Modules", *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 2035-2036*, s. 2 pages, 6853 kb, 2015, doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-5AV.6.32.
- [84] M. Kreidl a R. Šmíd, *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006.
- [85] A. Kaminski, J. J. Marchand, A. Fave, a A. Laugier, „New method of parameters extraction from dark I-V curve", in *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*, Anaheim, CA, USA, 1997, s. 203–206, doi: 10.1109/PVSC.1997.654064.
- [86] D. V. Ribeiro, C. A. C. Souza, a J. C. C. Abrantes, „Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to monitoring the corrosion of reinforced concrete", *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, roč. 8, č. 4, s. 529–546, srp. 2015, doi: 10.1590/S1983-41952015000400007.
- [87] M. Florides, G. Makrides, a G. E. Georghiou, „Early Potential Induced Degradation (PID) Detection in the Field: Solar Cell Shunt Resistance Measurement at Different Bias Conditions", *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1157-1160*, s. 4 pages, 6005 kb, 2018, doi: 10.4229/35THEUPVSEC20182018-5CV.1.6.
- [88] L. Cerná, T. Finsterle, P. Hrzina, a V. Benda, „Note on Cole-Cole Diagrams of Photovoltaic Modules Evaluation", *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1537-1540*, s. 4 pages, 5407 kb, 2017, doi: 10.4229/EUPVSEC20172017-5BV.4.3.
- [89] J. Thongpron a K. Kirtikara, „Voltage and Frequency Dependent Impedances of Monocrystalline, Polycrystalline and Amorphous Silicon Solar Cells", in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, Waikoloa, HI, 2006, s. 2116–2119, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279922.
- [90] J. Johnson, D. Schoenwald, S. Kuszmaul, J. Strauch, a W. Bower, „Creating dynamic equivalent PV circuit models with impedance spectroscopy for arc fault modeling", in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA, čer. 2011, s. 002328–002333, doi: 10.1109/PVSC.2011.6186419.
- [91] S. V. Spataru, H. R. Parikh, P. Hacke, G. A. Dos Reis Benatto, D. Sera, a P. B. Poulsen, „Quantification of Solar Cell Failure Signatures Based on Statistical Analysis of Electroluminescence Images", *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1466-1472*, s. 7 pages, 11818 kb, 2017, doi: 10.4229/EUPVSEC20172017-5CO.8.5.

12 Seznam publikací – s vazbou na disertační práci

	Autorský podíl (%)	Počet citací
Publikace v impaktovaných časopisech		
VENTOSINOS, F.; KLUSÁČEK, J.; FINSTERLE, T.; KÜNZEL, K.; HAUG, F.-J.; HOLOVSKÝ, J. Shunt Quenching and Concept of Independent Global Shunt in Multijunction Solar Cells. <i>IEEE Journal of Photovoltaics</i> . 2018, 4 1005-1010. ISSN 2156-3381. DOI 10.1109/JPHOTOV.2018.2828850.	15 %	3
HORYNOVÁ, E.; ROMANYUK, O.; HORÁK, L.; REMEŠ, Z.; CONRAD, B.; PETER AMALATHAS, A.; LANDOVÁ, L.; HOUDKOVÁ, J.; JIŘÍČEK, P.; FINSTERLE, T.; HOLOVSKÝ, J. Optical characterization of low temperature amorphous MoOx, WOx, and VOx prepared by pulsed laser deposition. <i>Thin Solid Films</i> . 2020, 2020(Volume 693), ISSN 0040-6090. DOI 10.1016/j.tsf.2019.137690.	5 %	1
HOLOVSKÝ, J.; STUCKELBERGER, M.; FINSTERLE, T.; CONRAD, B.; PETER AMALATHAS, A.; MÜLLER, M.; HAUG, F.-J. Towards Quantitative Interpretation of Fourier-Transform Photocurrent Spectroscopy on Thin-Film Solar Cells. <i>Coatings</i> . 2020, 10(9), ISSN 2079-6412. DOI 10.3390/coatings10090820.	15 %	0
POULEK, V., ŠAFRÁNKOVÁ, J., ČERNÁ, L., LIBRA, M., BERÁNEK, V., FINSTERLE, T. and HRZINA, P. PV Panel and PV Inverter Damages Caused by Combination of Edge Delamination, Water Penetration, and High String Voltage in Moderate Climate. <i>IEEE Journal of Photovoltaics</i> . 2021, 11(2), 561-565. ISSN 2156-3381. DOI 10.1109/JPHOTOV.2021.3050984 .	51 %	
Publikace v recenzovaných časopisech		
FINSTERLE, T.; ČERNÁ, L.; HRZINA, P.; BENDA, V. PID efekt na fotovoltaických elektrárnách. <i>Energetika</i> . 2015, 65(12), 659-661. ISSN 0375-8842.	50 %	0
Publikace excerptované ISI		
HOLOVSKÝ, J.; STUCKELBERGER, M.; FINSTERLE, T.; PURKRT, A.; HAUG, F.-J.; BENDA, V.; BERTONI, M.; BALLIF, CH. Subbandgap absorption spectroscopy of solar cell materials. In: ICANS26. International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors, Aachen, 2015-09-13/2015-09-18. Aachen: Institute of Energy and Climate Research Photovoltaics, 2015. s. 232.	17 %	1
Granty (bez smluvního výzkumu)		Rok
ČERNÁ, L.: Centre of Advanced Photovoltaic. 2017 - 2022, CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_003/0000464 – doktorand (173 mil. CZK)		2017-2022
Detekce degradace fotovoltaických panelů. SGS14/065/OHK3/1T/13		2014
Nalezení relace mezi koncentrací defektů, tloušťkou absorbéru a účinností. SGS15/074/OHK3/1T/13		2015
Studium tunelového přechodu vícevrstvých fotovoltaických článků SGS16/077/OHK3/1T/13		2016
Studium rozložení světla v závislosti na hrubosti povrchu perovskit článku SGS17/085/OHK3/1T/13		2017
Vytváření tenkovrstvých vodivých oxidů pomocí naprašování SGS18/067/OHK3/1T/13		2018
Vytváření tenkovrstvých struktur ZnO a MoOx pomocí pulsní laserové depozice SGS19/056/OHK3/1T/13		2019
Depozice a charakterizace tenkých vrstev MoOx, VOx a WOx připravených pomocí naprašování a pulsní laserové depozice SGS20/057/OHK3/1T/13		2020

Ostatní publikace	Autorský podíl (%)	Počet citací
ČERNÁ, L. a T. FINSTERLE. Economic Balance of Disposal of Photovoltaic Modules Installed in the Czech Republic. In: HUSNÍK, L., ed. Proceedings of the 20th International Scientific Student Conference POSTER 2016. 20th International Student Conference on Electrical Engineering, Praha, 2016-05-24. Praha: Czech Technical University in Prague, 2016. ISBN 978-80-01-05950-0.	50 %	0
FINSTERLE, T., L. ČERNÁ a V. BENDA. Účinnost fotovoltaiických modulů v podmínkách ČR. In: 36. Nekonenční zdroje elektrické energie. Vyškov, 2015-05-13/2015-05-15. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2015. s. 34-37. ISBN 978-80-02-02593-1.	50 %	0
ČERNÁ, L. et al. A Simple Method of Evaluating Thermograms of Photovoltaic Modules. In: EU PVSEC 2015 Proceeding. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2015-09-14/2015-09-18. Munich: WIP - Renewable Energies, 2015. s. 2035-2036. ISBN 3-936338-39-6. Dostupné z: https://www.eupvsec-proceedings.com	25 %	0
HRZINA, P. et al. Method of Reducing Losses of PV Power Plants Based on CIGS Technology with Transformerless Inverters. In: EU PVSEC 2015 Proceeding. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 2015-09-14/2015-09-18. Munich: WIP - Renewable Energies, 2015. s. 2384-2386. ISBN 3-936338-39-6. Dostupné z: https://www.eupvsec-proceedings.com	5 %	0
Finsterle, T.; Černá, L.; Šutka, J.; Benda, V. Degradace tenkovrstvých modulů. In: 37. Nekonenční zdroje elektrické energie. Vyškov, 2016-05-18/2016-05-20. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2016. s. 33-36. ISBN 978-80-02-02653-2.	40 %	0
Finsterle, T.; Klusáček, JK; Ventosinos, FV; Schüttauf, JWS; Hrzina, P.; Černá, L.; Benda, V.; Holovský, J. Study of Shunt Distributions in Thin Film Multijunction Solar Cells. In: EU PVSEC Proceedings. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Mnichov, 2016-06-20/2016-06-24. Munich: WIP - Renewable Energies, 2016. s. 1250-1252. ISBN 3-936338-41-8. Dostupné z: http://www.eupvsec-proceedings.com/	30 %	0
Černá, L.; Finsterle, T.; Hrzina, P.; Benda, V. IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND ITS POSSIBLE USE FOR DEFECTS DETECTION. In: EU PVSEC Proceedings. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Mnichov, 2016-06-20/2016-06-24. Munich: WIP - Renewable Energies, 2016. s. 1842-1845. ISBN 3-936338-41-8. Dostupné z: https://www.eupvsec-proceedings.com	20 %	0
FINSTERLE, T. a L. ČERNÁ. DIAGNOSTIKA DEFEKTŮ FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIÍ. In: 38. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE. 38. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE, Hustopeče, 2017-05-10/2017-05-12. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2017. s. 140-144. ISBN 978-80-02-02725-6.	60 %	0
ČERNÁ, L. et al. NOTE ON COLE-COLE DIAGRAMS OF PHOTOVOLTAIC MODULES EVALUATION. In: Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 2017-09-24/2017-09-28. Munich: WIP - Renewable Energies, 2017. s. 1537-1540. ISSN 2196-0992. ISBN 3-936338-47-7.	35 %	0
FINSTERLE, T. a L. ČERNÁ. LIGHT-SOAKING EFFECT ON CdTe THIN FILM PHOTOVOLTAIC MODULE. In: Nekonenční zdroje elektrické energie. 39. Nekonenční zdroje elektrické energie, Hustopeče u Brna, 2018-05-09/2018-05-11. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2018. s. 22-25. ISBN 978-80-02-02786-7.	80 %	0

Ostatní publikace

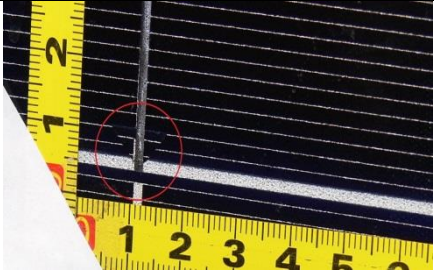


	Autorský podíl (%)	Počet citací
FINSTERLE, T.; ČERNÁ, L.; HRZINA, P.; BENDA, V. IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF CDTE PV MODULES – COMPARATIVE STUDY. In: EUPVSEC-proceedings. 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Brusel, 2018-09-24/2018-09-28. Munich: WIP - Renewable Energies, 2018. s. 897-898. ISSN 2196-0992. ISBN 3-936338-50-7. Dostupné z: https://www.eupvsec-proceedings.com/	60 %	0
Finsterle, T.; Černá, L.; Hrzina, P.; Rokusek, D. PID EFEKT, DIAGNOSTIKA A DŮSLEDKY. In: 40. NEKONVEČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE. Vémyslice, 2019-05-14/2019-05-17. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2019. s. 24-28. ISBN 978-80-02-02858-1.	30 %	0
FINSTERLE, T. et al. Korelace výsledků měření cole- cole diagramů a poklesu výkonu fotovoltaických panelů.. [Výzkumná zpráva] 2014. Zpráva č. 13113/2/2014.	50 %	0



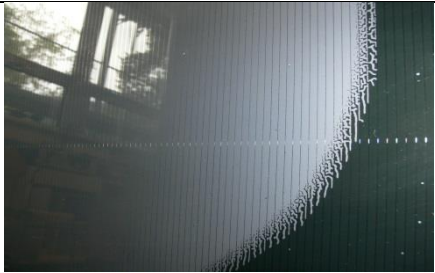
13 Seznam publikací autora – ostatní publikace

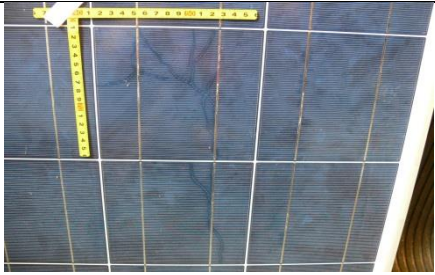

	Autorský podíl (%)	Počet citací
Publikace v impaktovaných časopisech		
X		
Publikace v recenzovaných časopisech		
ČERNÁ, L., T. FINSTERLE a I. KUDLÁČEK. Ekonomická bilance likvidace fotovoltaických modulů instalovaných v České republice během roku 2010. Energetika. 2018, 68(1), 48-55. ISSN 0375-8842.	40 %	0
Patenty		
X		
Publikace excerpované ISI		
FINSTERLE, T.; PILARČÍKOVÁ, I.; ALI BLÁHOVÁ, I.; UKRAINTSEV, E.; POTOCKÝ, Š.; STEHLÍK, Š.; KROMKA, A.; NEPOVIMOVÁ, E. et al. Microscopic study of multifunctional drug molecule adhesion to coatings with diamond and gold nanoparticles. In: Hasselt Diamond Workshop 2019 - SBDD XXIV. Hasselt, 2019-03-13/2019-10-15. Berlin: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2019. s. 44.	9,09 %	0
FINSTERLE, T.; PILARČÍKOVÁ, I.; ALI BLÁHOVÁ, I.; POTOCKÝ, Š.; REZEK, B. et al. Microscopic study of multifunctional drug molecule adhesion to electronic biosensors coated with diamond and gold nanoparticles. In: 10TH ANNIVERSARY INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOMATERIALS - RESEARCH & APPLICATION (NANOCON 2018). NANOCON 2018 - 10th Anniversary International Conference on Nanomaterials - Research & Application, Brno, 2018-10-17/2018-10-19. Ostrava: TANGER, 2019. s. 380-385. ISBN 978-80-87294-89-5.	10 %	0
Granty (bez smluvního výzkumu)		Rok
Studie na téma - Ekonomická bilance výroby a likvidace fotovoltaických modulů instalovaných v ČR – Inovavoucher 2015 – člen řešitelského týmu. (160 000 CZK)		2015
Ostatní publikace		
ČERNÁ, L. a FINSTERLE, T. Economic Balance of Disposal of Photovoltaic Modules Installed in the Czech Republic [online]. In: HUSNÍK, L., ed. Proceedings of the 20th International Scientific Student Conference POSTER 2016. 20th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha, 24.05.2016. Praha: Czech Technical University in Prague. 2016, ISBN 978-80-01-05950-0.	50 %	0
Černá, L.; Finsterle, T.; Kudláček, I.; Hrzina, P.; Benda, V.; Šutka, J. EKONOMICKÁ BILANCE VÝROBY A LIKVIDACE FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ INSTALOVANÝCH V ČR. [Výzkumná zpráva] 2015.	25 %	1
ČERNÁ, L. et al. STUDIE MOŽNOSTÍ INSTALACÍ HYBRIDNÍCH FOTOVOLTAICKÝCH SYSTÉMŮ ZÁLOHOVANÝCH SÍTÍ V ČR. [Výzkumná zpráva] PRAŽSKÁ PLYNÁRENSKÁ, a.s., 2016.	15 %	0

14 Přílohy

Přehled a příklady nejčastějších poruch odhalených vizuální kontrolou.

<p>Mechanické poškození různých částí modulu, rámu a junction boxů do té míry, že instalace nebo provoz modulu může být nebezpečný.</p> <p>Nenakontaktované fragmenty jednotlivých článků, jedná se pravděpodobně o úmysl zamaskovat vady ve výrobě.</p>	 <p><i>Obr. 55 Vložený nenakontaktovaný fragment</i></p>
<p>Bubliny nebo delaminace, která tvoří souvislou cestu mezi kterékoli částí elektrického obvodu a okrajem modulu.</p>	 <p><i>Obr. 56 Delaminace, jako majoritní vada</i></p>
<p>Ztráta mechanické integrity - např. rozbité krycí sklo. Jedná se o poškození, které může narušit běžný provoz modulu a bezpečnost.</p>	 <p><i>Obr. 57 Ztráta mechanické integrity</i></p>
<p>Jasně viditelná degradace zadní krycí fólie vlivem tepla.</p>	 <p><i>Obr. 58 Zahoření zadní krycí fólie</i></p>
<p>Tepelné poškození viditelné již na přední straně, typické zbarvení spojené s přehřátím podél kovových spojnic.</p>	 <p><i>Obr. 59 Tepelné poškození článku</i></p>



<p>Delaminace multikrystalického modulu. Proces delaminace je obvykle spojen s výrobními vadami, nebo spíše s technologickou nedokonalostí. Delaminace může probíhat mezi zapouzdřením a článkem nebo, zřídka, mezi sklem a zapouzdřovacím materiálem. V obou případech hrozí riziko pronikání vlhkosti.</p>	 <p><i>Obr. 60 Delaminace multikrystalického modulu</i></p>
<p>Delaminace monokrystalického modulu [39]</p>	 <p><i>Obr. 61 Delaminace monokrystalického modulu</i></p>
<p>Elektrochemická koroze a pak následná delaminace tenkovrstvého modulu.</p>	 <p><i>Obr. 62 Elektrochemická koroze a delaminace TF modulu</i></p>
<p>Rozbité sklo u tenkovrstvého modulu a následné pronikání vlhkosti.</p>	 <p><i>Obr. 63 Ztráta mechanické integrity u TF modulu</i></p>
<p>Zažloutlá EVA folie způsobující snížení propustnosti optického systému modulu.</p>	 <p><i>Obr. 64 Změna transparentnosti pouzďřicího materiálu</i></p>

<p>Snail trails - Šnečí cestičky. Jedná se o poruchu, kdy se na povrchu fotovoltaických článků, pod krycím sklem a laminační vrstvou EVA začnou objevovat změny zabarvení vypadající jako náhodné, až 1 cm široké cesty.</p>	 <p><i>Obr. 65 Šnečí cestičky</i></p>
<p>Delaminace zadní krycí fólie</p>	 <p><i>Obr. 66 Delaminace krycí fólie.</i></p>

Tabulka 6: Hlavní vizuální vady, které mohou způsobit selhání FV modulu.

Vizuální kontrola je jednoduchý nástroj pro identifikaci mnoha příčin poruch FV modulů. Některé, pouze estetické, problémy mohou indikovat rozvíjející se poruchu, která může v budoucnu způsobit značný pokles výkonu, mezi takové se bezesporu řadí snail trails [37]. Spousta defektů, které ovlivňují výkon modulu, jsou však neviditelné a je třeba je zkoumat s více sofistikovanými nástroji, přesto však může být vizuální kontrola velmi efektivní nástroj pro identifikaci vad, jako jsou: hot spots, delaminace, degradace EVA, problémy s junction boxy a mnoho dalších.

V posledních letech se objevila poměrně závažná degradace starších modulů, a to pozvolný rozpad zadní krycí fólie. Předmětné vady (označeny A – C) byly pozorovány v různém stádiu na různých systémech instalovaných v České republice.

Vada A	Průnik vlhkosti od kraje modulu
<p>Stopy migrace cínu mezi sběrníci a okrajem modulu. K tomuto jevu je nutný průnik vlhkosti do PV modulu, důsledkem je posléze snížení izolačního stavu.</p>	 <p><i>Obr. 67 Migrace cínu způsobená vlhkostí</i></p>
<p>Důsledek vniknutí vlhkosti do systému PV modulu. Následný elektrolytický rozklad sběrnice může vést až k přerušení obvodu a vzniku elektrického oblouku.</p>	 <p><i>Obr. 68 Elektrochemická koroze způsobená vlhkostí</i></p>

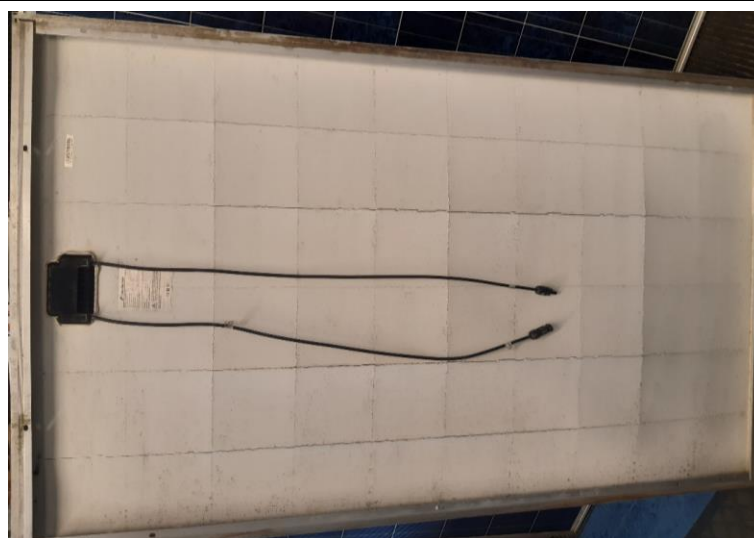
Vada B

Zadní stěna modulu z předchozího obrázku. Zde je patrné poškození zadní krycí vrstvy v oblasti mezi články. Toto poškození, vzhledem k hygroskopickým vlastnostem pouzdrvicí fólie, může být místem vnikání vlhkosti do vnitřní struktury PV modulu.

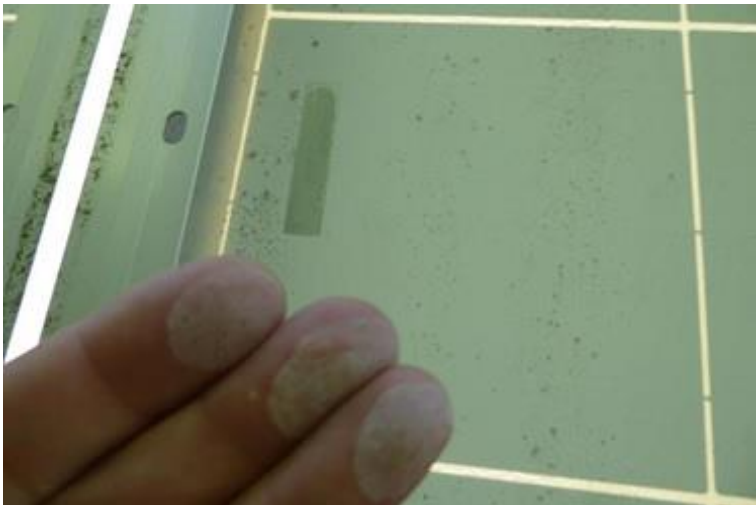
Porušení zadní krycí vrstvy - tedlaru

Obr. 69 Praskliny zadní krycí fólie

Postižení je patrné po celé zadní ploše modulu

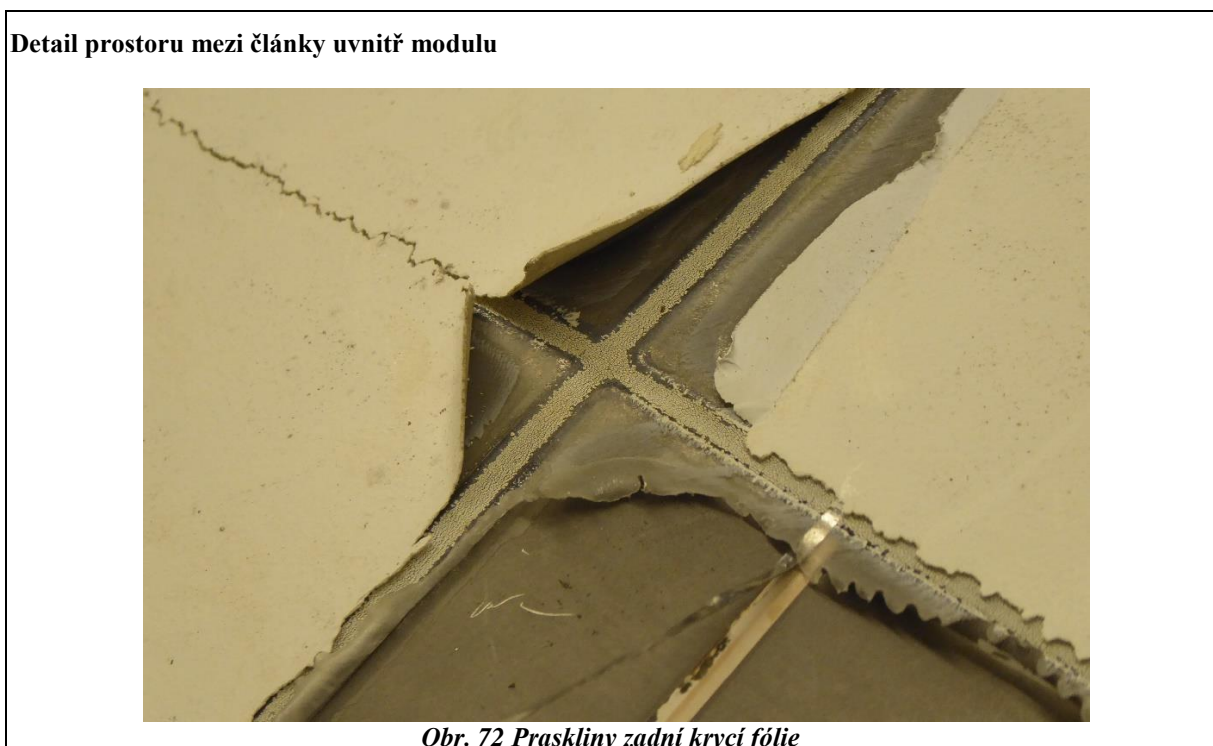


Obr. 70 Praskliny zadní krycí fólie

Vada C	Bělení tedlaru
<p>Bělení: po kontaktu se zadní stranou PV modulu je patrné zbarvení prstů. Struktura modulu Pravděpodobně se jedná o ranou fázi degradace zadní krycí vrstvy, která může gradovat až k praskání zadní krycí fólie.</p>	 <p><i>Obr. 71 Postupně degradující zadní krycí fólie</i></p>

Demontáž modulu, mikroskopická analýza

Za účelem prokázání přítomnosti vlhkosti byla provedena demontáž jednoho modulu a byly pořízeny mikroskopické snímky.



Modul po demontáži – boční pohled



Obr. 73 Netěsnosti mezi rámem a hranou skla modulu

Ze snímků je patrné pronikání vlhkosti do vnitřku modulu, a to jednak ze stran – nečistoty patrné pod těsnícím silikonem a jednak prostřednictvím poškozené zadní vrstvy – tedlaru. Voda pronikající rohovým spojem rámu, případně mezerami v nedostatečně kvalitním lepeném spoji mezi sklem a rámem, smáčela spodní hranu modulu, která nebyla ošetřena proti působení vlhkosti. V oblasti s lokální chybou laminace voda vzlínala po rozhraní mezi EVA a Tedlarem až do oblasti propojovací sběrnice, kde následně pronikla laminací ztenčenou vrstvou EVA fólie a uzavřela vodivé spojení mezi vnitřní strukturou PVM a rámem. Následné působení elektrolytických dějů postupně ukládalo nečistoty a soli do struktury EVA a způsobilo vznik trvalého vodivého spojení mezi rámem a vnitřní sběrnici. Analýza nepotvrdila obdobný proces na rozhraní EVA-sklo. Voda tedy pronikala do modulu pouze po rozhraní EVA–Tedlar, a to po velmi dlouhou dobu.