



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

Analýza vlivu defektů a zastínění na tvar VA  
charakteristicky fotovoltaického modulů

Bakalářská práce

Bachelor thesis

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Denis Misiurev

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

# Semestrální práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

*Student:* Denis Misiurev    *ID:* 186446    *Ročník:* 3    *Akademický rok:* 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

**Analýza vlivu defektů a zastínění na tvar VA charakteristiky fotovoltaického modulu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy činnosti solárních článků a panelů. Seznamte se se zařízením pro měření VA charakteristik a jeho principy.

Vytvořte analýzu vlivu různých defektů a zastínění na VA charakteristiky solárních modulů. Dlouhodobě monitorujte parametry solárních modulů při různých způsobech zastínění. Výsledky porovnejte a vyhodnoťte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího práce

*Termín zadání:* 5.2.2018

*Termín odevzdání:* 29.5.2018

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

*Konzultant:*

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno



## **ABSTRAKT**

Cílem semestrální práce na téma "Analýza vlivu defektů a zastínění na tvar VA charakteristiky fotovoltaického modulů" se seznámit s principy činnosti solárních článků a panelů. V teoretické části popíšeme princip činnosti fotočlánku z fyzického hlediska a VA charakteristiku fotočlánku. Následně, popíšeme jednotlivé etapy výroby fotočlánekového panelu. V praktické části porovnáme změřené VA charakteristiky kontrolních panelu a sestavíme grafy časové závislosti intenzity slunečního záření a výkonu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Slunečné záření, VA charakteristika, bod maximálního výkonu, fotočlánek, p-n přechod, antireflexní vrstva, metalizace, potenciální indukovaná degradace.

## **ABSTRACT**

The aim of the semester work on "The tool for evaluating the shape of VA characteristics of photovoltaic modules" is to wind out principles of operation of solar cells and panels. In the theoretical part we shall describe the principles of photocouple activity from physical point of view and VA characteristic of photocouple. Subsequently, we describe the individual stages of photoconduct panel production. In the practical part we compare measured VA characteristics of the control panels and build graphs of time dependence of solar radiation intensity and power.

## **KEYWORDS**

Solar radiation, VA characteristic, maximum power point, solar cell, p-n transition, antireflection layer, metallization, potential induced degradation.

**MISIUREV, D.** *Analýza vlivu defektů a zastínění na tvar VA charakteristiky fotovoltaického modulu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 50 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měřicí ústředna jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiří Vaněkovi, Ph.D a doc. Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Zvláště bych chtěl poděkovat panu Martinu Šturmovi za pomoc při montování a měření panelu.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## Obsah

Úvod.....	7
1 Fyzika fotočlánku a popis VA charakteristiky.....	8-11
1.2 Fyzika fotočlánku.....	8-10
1.2 Volt – ampérová charakteristika fotovoltaického článku.....	10-11
2 Výroba .....	12-15
2.1 Hlavní etapy výroby solárních článků metodou sítotisku.....	12-13
2.2 Výroba solárních panelů.....	13-15
3 Ochrana proti vzniku Hot spots, Schottkyho dioda.....	16-20
3.1 Vznik horkých míst, princip činnosti fotovoltaického panelu.....	16-18
3.2 Schottkyho dioda.....	18-20
4 Degradace slunečných panelů.....	21-28
4.1 Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapěťového stresu.....	21
4.2 Příčiny vzniku PID.....	21-22
4.3 Typické projevy PID.....	23-25
4.4 Koroze TCO.....	25-26
4.5 Degenerace materiálu.....	26-29
4.5.1 Etylvinylacetát .....	26-27
4.5.2 Defekty krystalové mřížky.....	27-28
4.5.3 Elektroluminiscence.....	28-29
5 Praktická část.....	29-43
5.1 Měření a vyhodnocování parametrů fotovoltaického panelu .....	29-35
5.2 Měření Volt – Amperových charakteristik a zastínění .....	36-43
6 Závěr .....	44
7 Seznam použité literatury.....	45-46
8 Seznam obrázků a grafů.....	47-49
9 Seznam tabulek.....	50

# ÚVOD

Přímo k výrobě elektřiny je možné využít slunečního záření v tzv. fotovoltaických systémech. Jsou založené na fotoelektrickém jevu. Fotoelektrický jev je fyzikální jev, během něhož se energie světelného kvanta – fotonu – předá elektronu v látce a převede ho tak ze stavu s nižší energií do stavu s vyšší energií. Polovodičová struktura článku pak uspořádává pohyb elektronů na využitelný stejnosměrný elektrický proud. Parametry fotovoltaického článku se popisují voltampérovou charakteristikou, která udává závislost proudu na napětí. Voltampérová charakteristika má definované význačné body – parametry, které používáme při posuzování kvality fotočlánků a při návrzích fotovoltaických systému a zařízení.

Samotná výroba solárních panelu se skládá z mnoho etapu. V kapitole výroba se podíváme a popíšeme jednotlivé základní procesy a etapy výroby solárního panelu od samotného solárního fotovoltaického článku po kompletní panel. Uvedeme základní zařízení pomoci, kterého probíhá samotná výroba.

Během výroby a dlouhodobého používání solárních panelů můžou vzniknout defekty který můžou výrazně ovlivnit funkčnost panelu. V následující kapitole popíšeme, jaký defekty můžou vyskytnut během používání panelu a jak uvedené defekty působí na funkčnost panelu.

V závěrečné kapitole popíšeme naše pracoviště, jakým způsobem jsme prováděli zastínění a jaký vliv mělo zastínění na tvar Volt–Amperově charakteristiky. Ukážeme, jak se měnil vystuňu generování výkon za celou doby našeho měření.

# 1 Fyzika fotočlánku a popis VA charakteristiky

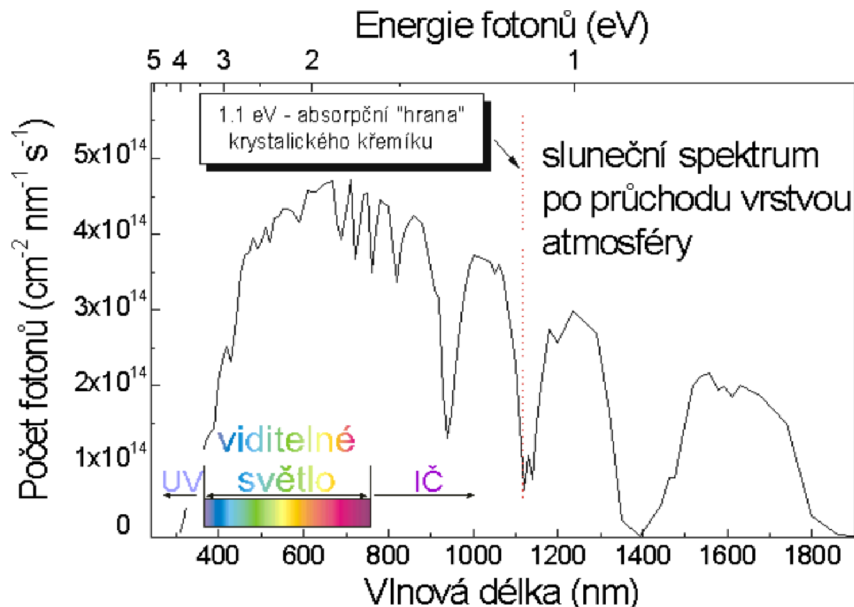
## 1.1 Fyzika fotočlánku

Pro výrobu fotovoltaických článků velmi vhodným materiálem křemík (Si). Jedná se o druhý nejrozšířenější prvek na Zemi, jeho zpracování pro potřeby mikroelektroniky dosáhlo velmi vysoké úrovně. Dnes možno získat křemíkové krystaly nepředstavitelné čistoty – až 99,99 %. Výhodné vlastnosti má křemík i z fyzikálního hlediska s tím že malá šířka zakázaného pásu křemíku (pás, ve kterém se standardně nenacházejí žádné částice) dovoluje dosáhnout velmi vysoké generace volných nosičů.



Obr. 1.1 Pasový model křemíku. [2]

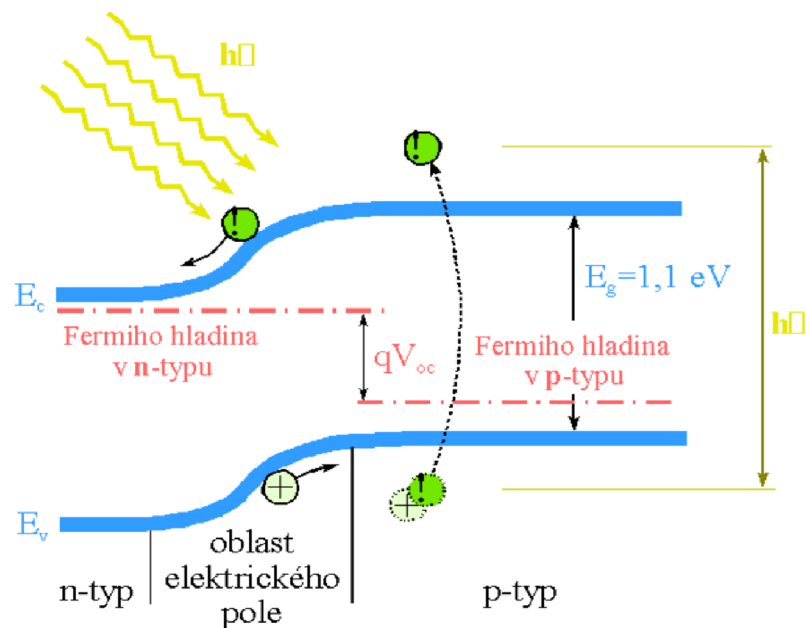
Krystalický křemík má stejnou krystalovou strukturu jako diamant. Na rozdíl od diamantu však není průhledný, absorbuje světlo o kratší vlnové délce než zhruba 1 mikrometr (fotony o větší energii než zhruba 1,1 elektronvoltů), to jest část infračerveného, celé viditelné a ultrafialové spektrum. Absorbuje tedy větší část celého slunečního spektra. To je znázorněno na obrázku 1, kde vidíme spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou, spolu s absorpční hranou křemíku. [1]



Obr. 1.2 Sluneční spektrum po průchodu atmosférou. Současně je vyznačena absorpční hrana krystalického křemíku. [1]

Dopadá-li na křemík foton o energii menší než 1,1 elektronvoltů, projde křemíkem a není absorbován (tato energie neodpovídá šířce zakázaného pásu). Když je jeho energie větší než

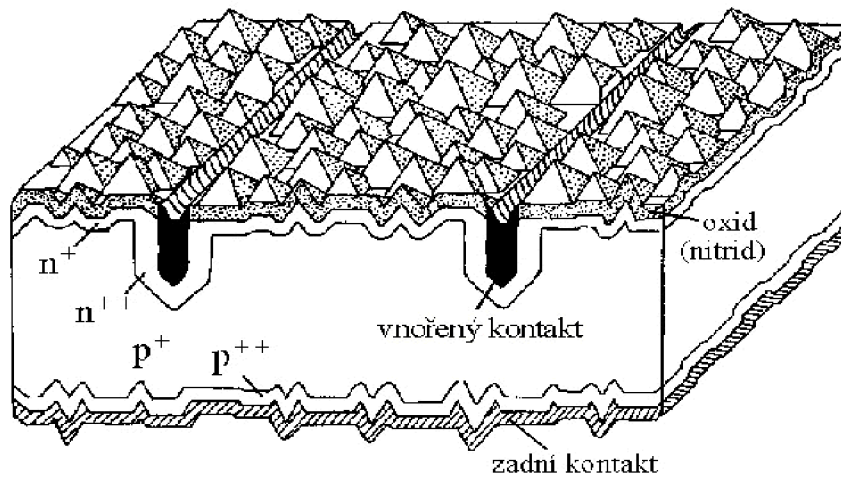
1,1 elektronvoltů (tato energie odpovídá šířce zakázaného pásu, a tedy absorpční hraně křemíku) pak je tento foton absorbován a v polovodiči vznikne jeden volný elektron a jedna volná díra. Energetický rozdíl mezi energií dopadajícího fotonu a šířkou zakázaného pásu se přeměňuje na teplo. Aby sluneční článek sloužil jako zdroj proudu, musí v něm nastat rozdělení elektronů a děr. Sluneční článek není homogenní polovodič, ale skládá se z různých částí. Strana obrácená ke slunečnímu světlu je záporně dotována fosforem (materiál typu n, mající elektronovou vodivost) a vrstva ležící pod ní je kladně dotovaná bórem (materiál typu p, mající děrovou vodivost). Na přechodu p-n dojde k oddělení díry a elektronu a na přívodních kontaktech vznikne pracovní napětí 0,5-0,6 V ( $V_{oc}$  je napětí, které vzniklé následkem osvětlení p-n přechodu.) a připojíme-li ke kontaktům spotřebič, protéká jím elektrický proud. Ten je přímo úměrný počtu absorbovaných fotonů, a tedy i ploše celého slunečního článku. [1]



**Obr. 1.3** Pásové schéma p-n přechodu krystalického křemíku za osvětlení (energie fotonů  $h\nu$ ) s vyznačením hran vodivostního ( $E_c$ ) a valenčního ( $E_v$ ) pásu, šířky zakázaného pásu ( $E_g = E_c - E_v$ ), Fermiho hladin v polovodiči typu n i p a oblasti existence vnitřního elektrického pole (prostorového náboje). [1]

fotovoltaický sluneční článek je tedy polovodičová dioda (přechod p-n) mající velkou plochu (decimetry čtvereční), spodní celoplošný kovový kontakt (reflektor) a vrchní kovový kontakt (mřížku, hřeben) zabírající velmi malou plochu (4-8 % plochy článku), aby Článek mohl pohlít co nejvíce fotonů. [1]

Skutečná struktura je mnohem složitější, jak je vidět na obrázku 1.4, s cílem zmenšení všech možných ztrát (reflexe světla, rekombinace nosičů proudu) a realizace co největší účinnosti přeměny sluneční energie v energii elektrickou. [1]

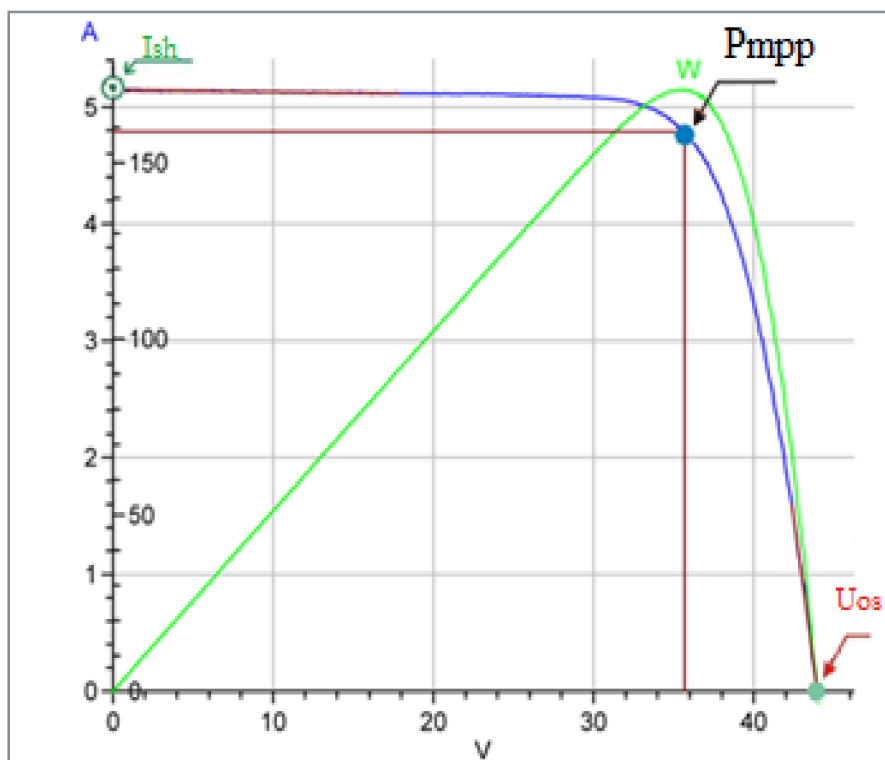


**Obr. 1.4** Schematické znázornění struktury křemíkového solárního článku se zanořenými kontakty na přední straně. Texturovaný povrch pro snížení reflexe a zvýšení "light trapping" efektu je vytvářen využitím anizotropního leptání křemíku na rovině  $\langle 100 \rangle$ . Vrstva oxidu, případně nitridu křemíku je použita pro pasivaci povrchu křemíku a pro snížení reflexních ztrát. Zadní kontakt (Al) funguje jako zpětný reflektor. [1]

Sluneční články se spojují sériově a paralelně do slunečních panelů, které již dávají požadované napětí a stejnosměrný proud. Malý konvertor umožňuje připojení na standardní střídavou síť 220 V. [1]

## 1.2 Volt – ampérová charakteristika fotovoltaického článku

Při vyhodnocování parametrů fotovoltaických článků hraje poměrně značnou roli voltampérová charakteristika testovaného článku.



**Obr. 1.5** Klasická VA charakteristika fotočlánků [3]



Mezi základní parametry fotovoltaických článků patří:

- proud nakrátko  $I_{sh}$ ,
- napětí naprázdno  $U_{oc}$ ,
- paralelní odpor  $R_p$  reprezentující poruchy v článku,
- sériový odpor  $R_s$ , který představuje elektrické ztráty,
- bod maximálního výkonu  $P_{mpp}$  nebo  $P_{max}$ ,
- činitel plnění (fill factor) FF, který je dán poměrem maximálního výkonu a ideálního výkonu dodávaného článkem,
- účinnost  $\eta$  daná poměrem maximálního výkonu a osvětlení článku  $P_{in}$ .

### **Proud nakrátko – $I_{sh}$ (Short Circuit)**

Proud nakrátko je ve své fyzikální podstatě maximální proud, který může fotovoltaický článek při daném slunečním osvětlení dodávat. Velikost tohoto proudu je závislá na:

- intenzitě osvětlení;
- spektrální citlivosti fotovoltaického článku;
- ploše fotovoltaického článku;
- teplotě.

### **Napětí naprázdno – $U_{oc}$ (Open Circuit)**

Napětí naprázdno je další charakteristickou hodnotou voltampérové charakteristiky jako je proud nakrátko. Toto napětí je ve své fyzikální podstatě napětím, které je na svorkách fotovoltaického článku bez připojené zátěže. Toto napětí je maximálním napětím fotočlánku při dané teplotě a intenzitě osvětlení. [3]

### **Bod maximálního výkonu $P_{mpp}$ nebo $P_{max}$**

Je tady nutné nejprve vypočítat průběh křivky výkonu panelu, jako součin naměřeného napětí a proudu. Poté nalezneme nejvyšší dosaženou hodnotu, kterou můžeme považovat za hodnotu  $P_{max}$ . Při ručním měření je třeba zaznamenat dostatečné množství dat v oblasti předpokládaného bodu  $P_{max}$ . [3]

### **Činitel plnění – FF (Fill Factor)**

Činitel plnění udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodiivé vrstvy. Tento poměr se uvádí jako tzv. činitel naplnění. [3]

### **Účinnost fotovoltaického článku – $\eta$**

Účinnost přeměny slunečního záření fotovoltaického článku je dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je fotovoltaický článek vyroben. Tento materiál ovlivňuje spektrální citlivost (rozložení spektrální citlivosti) fotovoltaického článku na dopadající záření tzn., že fotovoltaický článek využívá energii různých vlnových délek s různou účinností. [3]

## 2 Výroba

### 2.1 Hlavní etapy výroby solárních článků metodou sítotisku

1. Počáteční substrát. Substráty, z nichž začíná výroba solárních článků, o tloušťce přibližně 0,5 mm a ploše 10 x 10 cm<sup>2</sup>. Obvykle se jedná o substrát p-typu mírně dotovaný borem (1e16 atomů / cm<sup>3</sup>).
2. Gravírování poškození po řezání. Povrch substrátu po řezání má obvykle nepravidelnosti a je potažen chladícím mazivem.
3. Čistění povrchu podkladu silným alkalickým roztokem a odstranění poškozené vrstvy křemíku.
4. Vytvoření spojení p-n leptaným. Zahřívání substrátu ve speciální peci na 800-1000 ° C ve fosforové atmosféře vede k tomu, že se do vnějších vrstev křemíku zavede malé množství fosforu.
5. Leptání hran velmi aktivním plazmovým plynem. Destičky jsou položeny jeden nad druhým, aby se odstranily p-n skoky z hran.
6. Po leptání plazmou se horní vrstva již nedotýká spodní vrstvy.
7. Sítotisk přední metalizace. Na přední plochu se přidá šablona a pájecí pasta.
8. Speciální těrka provádí aplikaci pájecí pasty přes šablonu.
9. Šablona je odstraněna a zanechává tlustou vrstvu vlhké pasty.
10. Pasta se pak suší v peci, aby se odstranily organická rozpouštědla a pojidla.
11. Povrchové kontakty jsou tenké kovové linie, které snižují ztráty způsobené zastíněním.
12. Pálení pájecí pasty do struktury fotočlánku přes pec při vysokých teplotách.
13. Sítotisk zadního kontaktu.
14. Sušení pasty v peci.
15. Hoření zadního kontaktu. Prvek je umístěn v peci s mnohem vyšší teplotou, aby se vytvořil kontakt mezi kovem a křemíkem. (Hoření ničí zadní n-vrstvu, takže kov vytváří kontakt s hlavním substrátem typu p.)
16. Solární článek je připraven k umístění do modulu.

Fotovoltaické měniče (v literatuře je často jiná definice – solární články, anglický Solar cells) – polovodičová zařízení, která přeměňují energii slunečního záření na elektrický proud. Existuje mnoho způsobů, jak přeměnit solární energii na elektrickou energii, zatímco

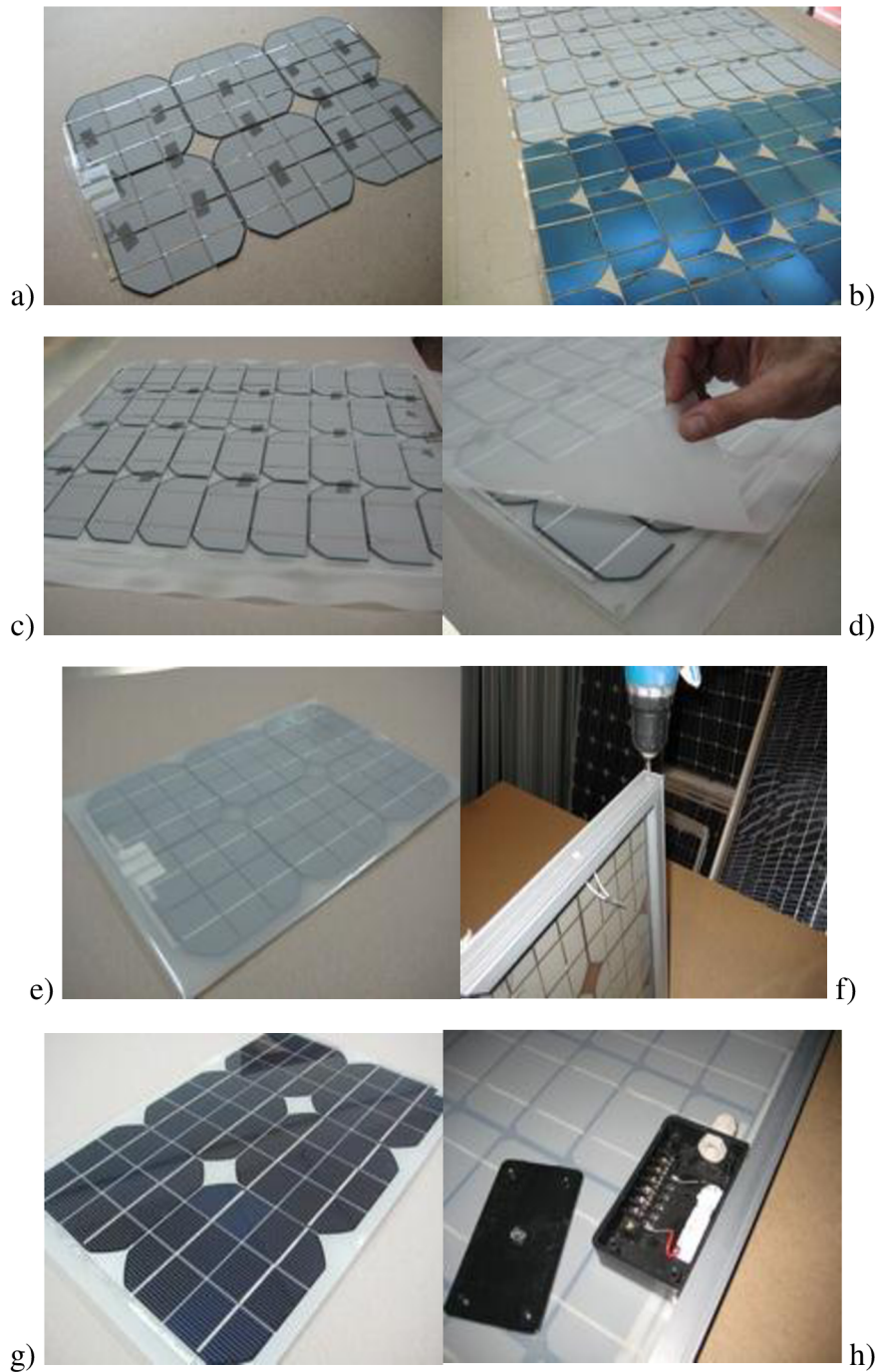
technologicky se mohou velmi lišit –jak fyzikálními principy, tak technickou implementací. Nejúčinnější – a to jak z hlediska organizace výroby a ekonomické proveditelnosti energie, jsou zařízení používaná pro konverzi sluneční energie fotovoltaický polovodičových měničů, jejichž hlavní předností je jednostupňový přímý přenos energie. [4]

## 2.8 Výroba solárních panelů

Propojení sériové a paralelně připravených fotoelektrických článku do řetězců (například 6 × 12 prvků). Pájení se provádí pomocí stringer mašiny. Následně se vytváří „sendviče“ sestávající ze skla, fólie z těsnicího materiálu EVA (Ethylenvinylacetát), fotoelektrických článku, druhé vrstvy EVA a zadní ochrany modulu skládající se vícevrstevné pevné fólii z plastu; testování výsledného polotovaru za nepřítomnosti přerušení elektrického obvodu; další etapou výroby je laminace. Počítač kontrolují takové parametry, jako je tlak, teplota atd. Laminace se provádí za sníženého tlaku a při teplotě 150 C°. V závislosti na použitém materiálu parametry laminace může být změněny. Následně se provádí odstranění přebytečných materiálů. Připravený v předchozích fázích, výrobek je již schopen generovat elektrickou energii, ale stále ještě není konečným produktem. Konečným etapám je montáž hliníkových rámu a propojovacího boxu. [5]



Obr. 2.1 Stringer mašina [9]



**Obr. 2.2 a,b,c,d,e,f,g,h** Jednotlivé etapy výroby slunečního panelu a) Pájení fotočlánků b) Formování stringeru c) Ukládání stringerů na vrstvu EVY a krycího skla d) Formování „sendviče“ e) Laminace f) Montáž rámu h) Montáž propojovacího boxu [10]



Obr. 2.3 a,b Výrobní laminátory [10]

### 3 Ochrana proti vzniku Hot spots, Schottkyho dioda

#### 3.1 Vznik horkých míst, princip činnosti fotovoltaického panelu

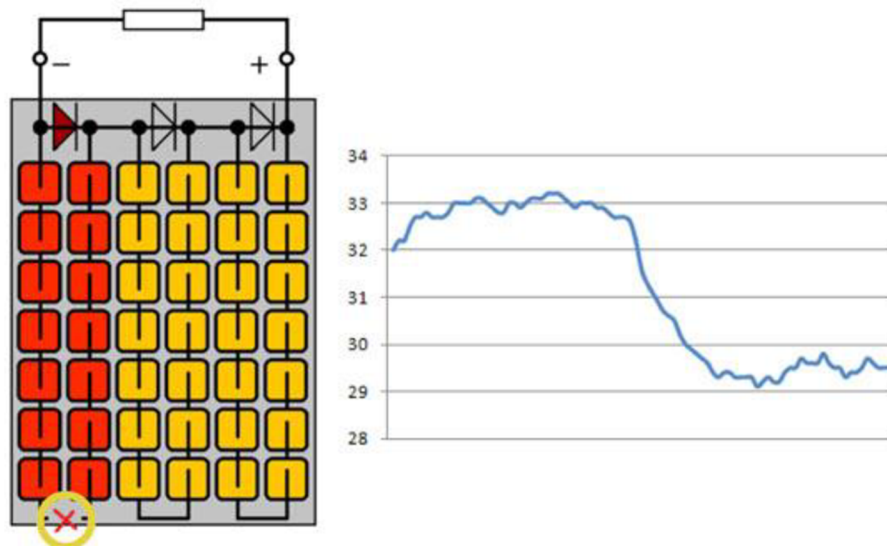
FV moduly přeměňují dopadající sluneční záření na elektrický výkon. Běžně používané moduly mají účinnost okolo 17 %, to znamená, že 83 % záření je v panelu přeměněno na teplo. Řádně nepřipojený modul přeměňuje všechno dopadající záření na teplo, a proto je teplejší. FV modul se skládá z jednotlivých článků, které jsou zpravidla zapojeny sériově a navzájem vyváženi. Pokud je uzavřen elektrický obvod, každý článek by měl vyrábět stejné množství proudu. Pokud je nějaký článek slabší (má výrobní vadu nebo je zastíněný) anebo už nevyrábí dostatečnou energii, dochází k jeho přepólování. Ostatní články v sérii předávají část své vyrobené energie právě do této slabší buňky, to vede k jejímu zahřátí (vznik "Hot spots"). [8]

Již teplota o 50 °C vyšší, než je teplota okolních článků může vést k poškození panelu. Při teplotě nad 150 °C dochází k trvalému poškození. Samozřejmě takto zahřátému článku velice rychle klesá životnost a elektrický proud zvyšuje závěrné napětí. Může dojít k delaminaci fotovoltaického panelu, poškození fólie či rozbití skla. Delaminace se projevuje separací jednotlivých částí panelu, která vede ke vzniku dutin či bublin a výsledkem je porušení správné funkčnosti panelu, což prospívá k poklesu celkové výkonnosti panelu, a nakonec vede k tepelnému zničení. [15]

Jedním z důvodů vzniku hot spots je například zastínění. V případě zastínění článku panelu dochází k situaci, kdy se zastíněný článek přestává chovat jako zdroj elektrické energie, ale naopak energii vyprodukovanou ostatními články začíná spotřebovávat, čímž dochází k jeho přehřívání. [15]

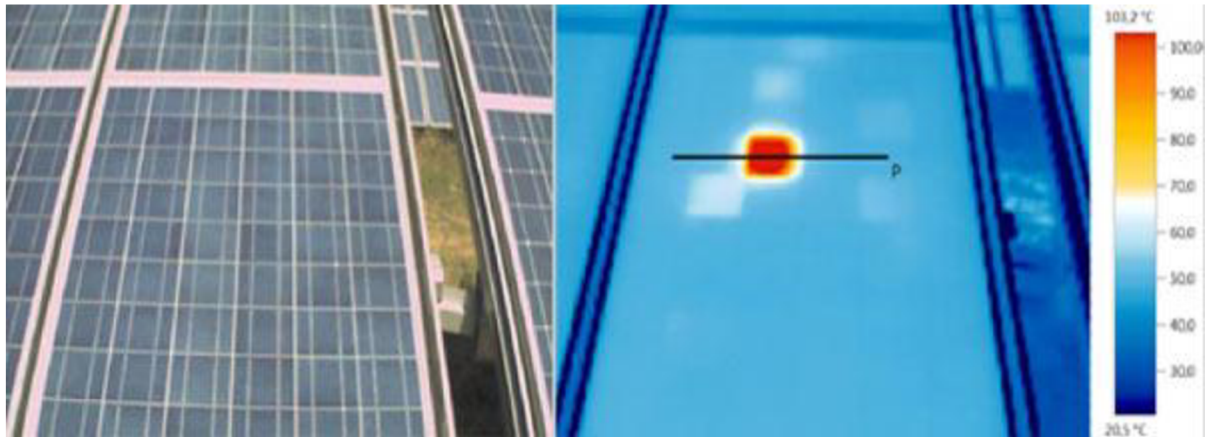
Hot spots také vznikají v místech defektů krystalické mřížky fotovoltaických článků. [15]

Aby se zabránilo této situaci, jsou mezi jednotlivé části panelu instalovány tzv. bypassové diody. [8]



Obr. 3.1 Schematické znázornění závady na fotovoltaickém modulu. [8]



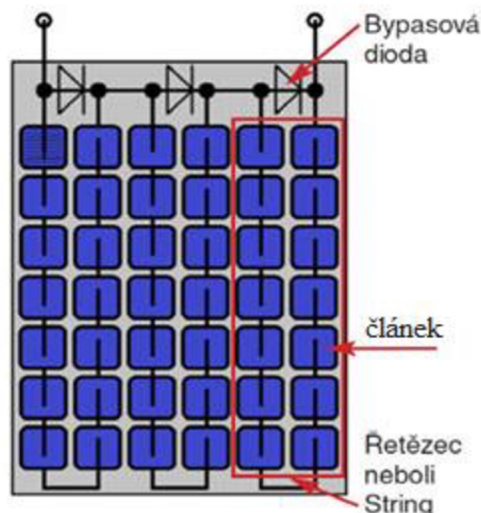


**Obr. 3.2** Reálný snímek a termogram fotovoltaického modulu s vadnou buňkou. Na reálném snímku není žádná závada zjstiteľná. [8]

Když je solární panel vystaven slunečnímu světlu, vzniká tzv. přímá vazba a přenáší jeho výstupní proud v určitém směru. Ve tmě vzniká spatná vazba a proud může proudit zpět do článků a rozptýlit se jako teplo. Když část solárního panelu spadne do stínu, zastíní se nebo je slabá, vznikne stejná situace. Zastínována část panelu přestává generovat proud a vzniká zpětná vazba. [16]

Problém s takovou částí je, že ve zbytku panelu výstupní proud nekontrolovaným způsobem teče zpátky do neaktivních článků. To způsobuje, že články rozptýlí velké množství energie ve formě tepla, což povede k přehřátí a možné tepelné destrukci panelu. Levný a jednoduchý způsob, jak tuto situaci vyřešit, je vložení bypassových diod. [16]

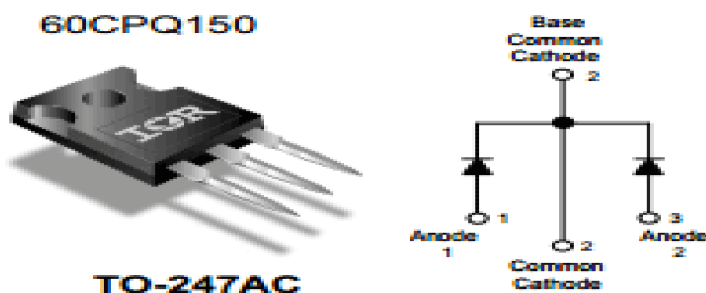
Bypassová dioda je připojena paralelně ke každému stringeru v závěrném směru. Pokud panel funguje správně, dioda zůstává neaktivní. Jak mile panel začíná fungovat spatně, dioda mění svou polaritu (otevírá se) a začne odvádět přebyteční proud od vadného článku a efektivně chrání panel před vzniku horkých míst. Panel dočasně generuje o 25 % méně výstupního výkonu než při normálním provozu. [16]



**Obr. 3.3** Uspořádání fotovoltaického panelu [8]

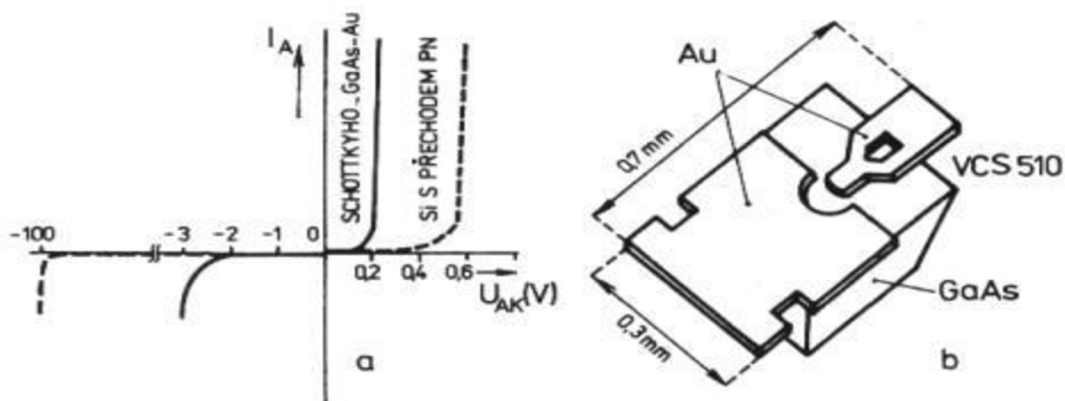
Bylo by nejvýhodnější, pokud by dioda byla u každého článku, to by však velice prodražilo výrobu. [8]

### 3.2 Schottkyho dioda



Obr. 3.4 Uspořádání schottkyho dioda [7]

Pro minimalizaci poklesu napětí (0,2-0,4 voltů) musí mít diody malý odpor, takže v poslední době jsou nejčastěji používány Schottky diody s nízkým odporem. [6]



Obr. 3.5 Charakteristika a vzhled schottkyho diody [6]

Schottkyho diody jsou prvky, které ke své činnosti využívají usměrňovací vlastnosti přechodu kov – polovodič N (Schottkyho přechodu). Velkou výhodou je, že v něm nedochází k injekci minoritních nosičů náboje. Vedení proudu je realizováno pouze majoritními nosiči, což přináší mnoho výhod. Schottkyho přechody mají v přímém směru menší úbytky napětí než přechod PN. Dále v přechodu kov – polovodič nevznikají oblasti s přebytečnou koncentrací minoritních nosičů náboje a majoritní nosiče, které jsou rozptýleny ve velmi krátkém čase (řádově  $10^{-13}$  s). Z polovodiče N přecházejí do kovu horké elektrony z vrcholu energetické bariéry, které v kovu ztrácejí přebytek své energie a vracejí se energeticky na úroveň Fermiho hladiny v kovu  $W_{FK}$ . To předurčuje Schottkyho diody pro zpracování signálů s vysokými kmitočty. [19]

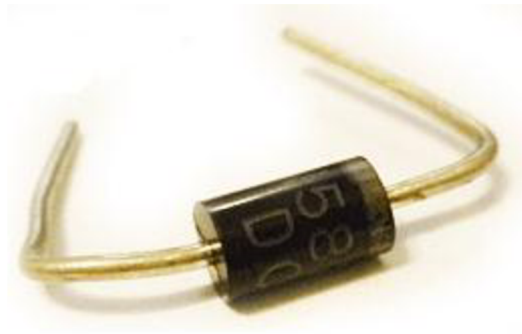
V práci se můžete setkat se diody, který jsou schopni usměrňovat proud dosahující maximálně 400 A! Příkladem je model VS-400CNQ045. [7]



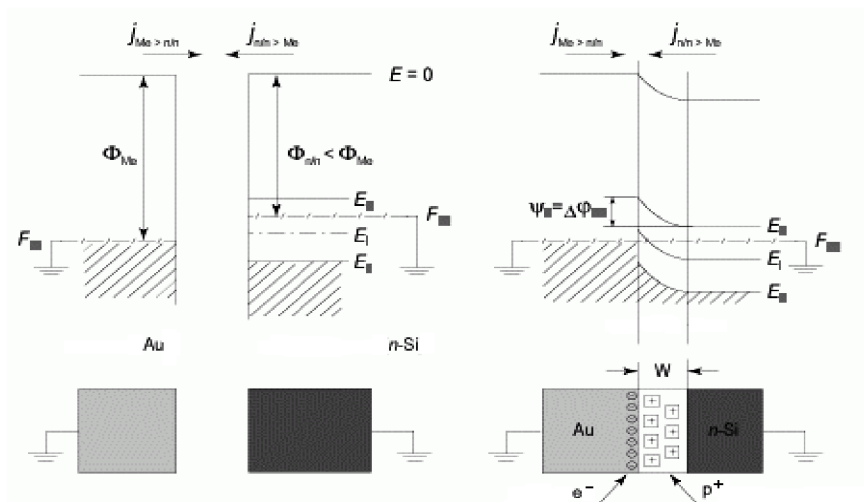
Obr. 3.6 Model VS-400CNQ045 [18]



Také docela dobře známý dioda je 1N5822 (DO-201AD). Je určena pro stejnosměrný proud 3 A. [7]



Obr. 3.7 Model DO-201AD [7]



Obr. 3.8 Pasová struktura schotkyho přechodu [5]

Malý pokles napětí v přímém směru (0,2-0,4 voltů) umožňuje využívat schotkyho diody ve výkonové technice jako usměrňovače a spínače s větší energetickou účinností, menšími rozměry a hmotností než u klasických diod. [7]

Bohužel, tak malý pokles napětí nastává, když napájecí napětí je menší než 50-60 voltů. Při dalším nárůstu napětí schotkyho diody se chová jako obyčejná křemíková dioda. Maximální reverzní napětí pro schotkyho diodu obvykle nepřesahuje 250 voltů, i když na trhu jsou diody na 1,2 kilovoly (VS-10ETS12-M3) [7]



Obr. 3.9 Model VS-10ETS12-M3 [17]

Nevýhody diod se schottkyho bariérou je ta, že při krátkodobém působení přebytku zpětného napětí se okamžitě zničí. Narodil od křemíkových diod, který se vrátí do původního stavu. Navíc zpětný proud schottkyho diod velmi závisí na teplotě přechodu. Při velkém zpětném proudu dochází k tepelnému průrazu. [7]

<b>Název</b>	MAX. zpět. pik. napětí	Max. usměř. proud		Max. pikový proud	MAX. zpět. proud
	<b>V</b>	<b>A</b>	<b>°C</b>	<b>A</b>	<b>μA</b>
1N5817	20	1,0	90	25	1,0
1N5818	30	1,0	90	25	1,0
1N5819	40	1,0	90	25	1,0
1N5821	30	3,0	95	80	2,0
1N5822	40	3,0	95	80	2,0

**Tab. 3.1** Parametry nejběžnějších Schottky diod s nízkým výkonem [5]

## 4 Degradace solárních panelů

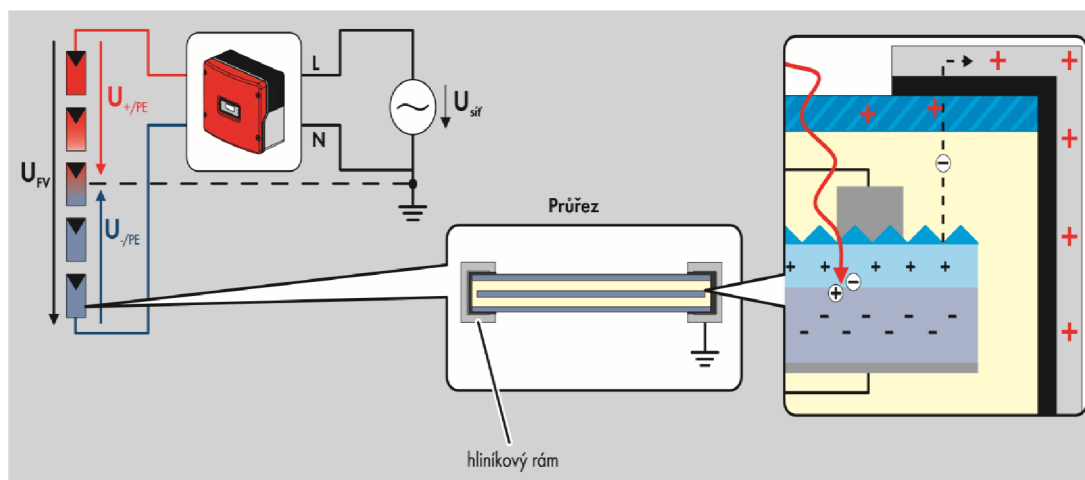
### 4.1 Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapěťového stresu

Potenciální indukovaná degradace (PID) je nežádoucí jev, který zasahuje mnohé typy fotovoltaických modulů. Hlavními faktory, které umožňují rozvoj PID, jsou: vysoký rozdíl napětí ve stringu, teplo a vlhkost. [11]

V zásadě se jedná o mezivrstvou polarizaci vedoucí až k nevratné degradaci křemíku ve fotovoltaických panelech, která souvisí s rozdílem potenciálů vůči zemi. Potenciální indukovaná degradace způsobuje nevhodnou změnu polarizace nábojů fotovoltaického článku a díky tomu není tento článek schopen dodávat elektrický proud. K tomuto jevu dochází zejména na fotovoltaických panelech, které jsou nejbližší u záporného pólu ve stringu (řada za sebou zapojených panelů). Zde se totiž potenciál (napětí vůči zemi) fotovoltaických článků podle délky daného stringu (tzn. počtu panelů ve stringu) a typu používaného střídače obvykle pohybuje mezi od 250 V až 450 V. Rám fotovoltaických panelů má ale oproti tomu potenciál 0 V, protože z bezpečnostních důvodů musí být uzemněný. Kvůli tomuto elektrickému napětí mezi fotovoltaický články a rámem může dojít k vzniku svodových proudů. To za sebou zanechá náboj (polarizaci), který může nevýhodným způsobem pozměnit charakteristickou křivku fotovoltaických článků. [11]

S rostoucím rozdílem potenciálů přitom roste úměrně i riziko vzniku degradace křemíku a ztráta výkonnosti panelů. Čím více je tedy zapojených modulů ve stringu, tím je riziko degradace a výsledný úbytek výkonnosti vyšší. Nejdříve se tedy PID začne projevovat a největší poškození je pozorovatelné na posledním panelu na záporném konci stringu. Čím déle PID působí, tím více postupuje poškození na další panely směrem ke kladnému konci stringu. U některých aktuálně realizovaných měření na elektrárnách přímo v terénu bylo zjištěno zasažení PIDem až do 8. panelu od záporného konce a ztráta výkonu posledních panelů ve stringu až 70 procent původního výkonu. Dílčí rozdíly jsou patrné v závislosti na typu použitého panelu, způsobu zapojení a některých dalších parametřů. [11]

### 4.2 Příčiny vzniku PID

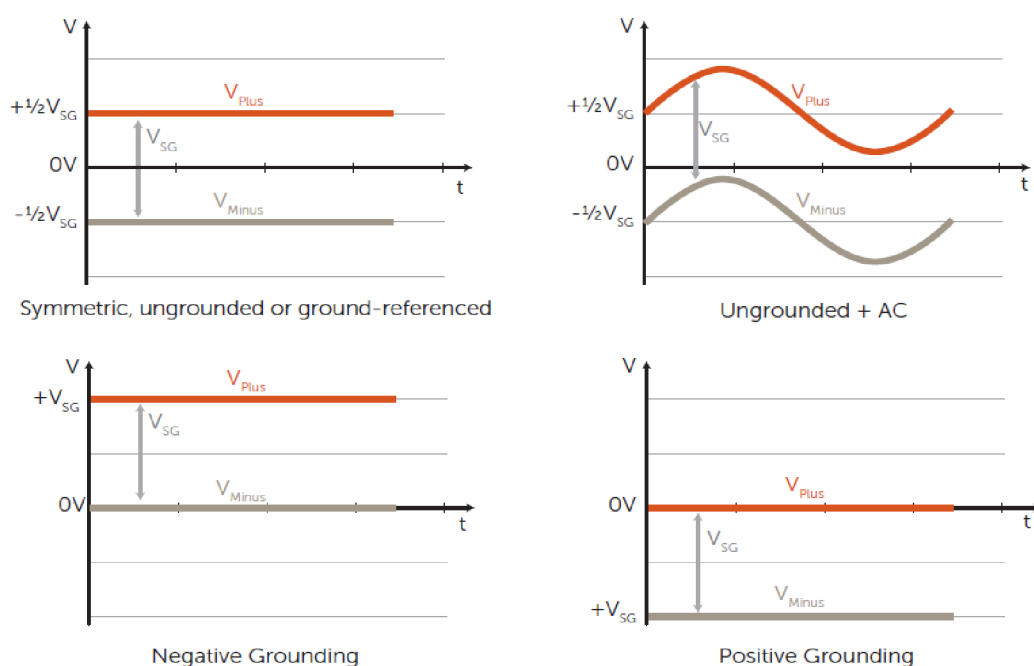


**Obr. 4.1** Svodový proud je způsoben napěťovým potenciálem a způsobují jej negativní (-) ionty migrující od polovodičů a pozitivní (+), ionty migrující z obalu skla a polovodičů a vnějšího prostředí [11]

Jak již název napovídá, k potenciální indukované degradaci dochází vlivem napětí v modulu a svodového proudu tvořeného ionty procházejícími mezi polovodičový materiál a dalšími prvky modulu (např. sklo, rám, konstrukce), jak je znázorněno na obrázku 1, což způsobuje snižování výstupního výkonu. Mobilita iontů se zrychluje s rostoucí vlhkostí, teplotou a napěťovým potenciálem. [11]

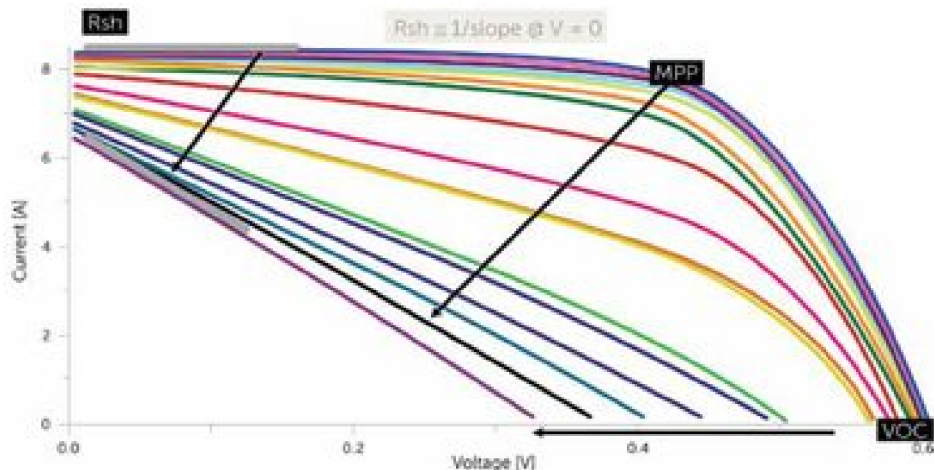
Vysoká teplota a vysoká vlhkost způsobuje urychlení degradačního efektu způsobeného PIDem. Bylo rovněž prokázáno, že nízké teploty a nízká vlhkost napomáhají regeneraci modulů zasažených PIDem. Vzhledem k tomu, že vliv prostředí nemůžeme téměř vůbec ovlivnit, tak regeneraci panelů je potřeba řešit systémově. [11]

Nejdůležitějšími faktory jsou napětí ve stringu, pozice panelu ve stringu a systém uzemnění stringu. Běžně se můžeme setkat se čtyřmi variantami uzemnění. [11]



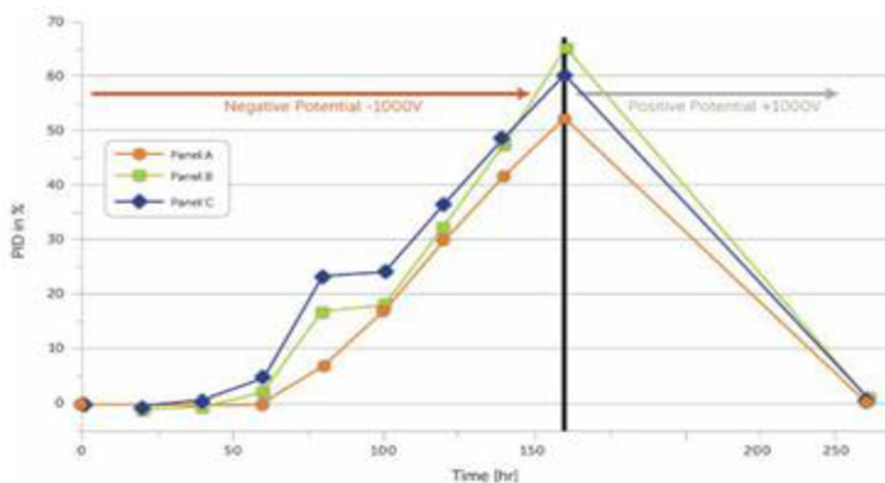
**Obr. 4.2** Napěťový potenciál závisí na systému uzemnění, což může mít tyto čtyři základní klasifikace [11]

### 4.3 Typické projevy PID



**Obr. 4.3:** Jak je vidět zde snížení paralelního odporu (Rsh) vede k poklesu maximálního pracovního bodu (MPP) a napětí naprázdno [11]

Jak je vidět na obrázku 3, tak snížením paralelního odporu (Rsh) solárního článku se sníží i maximální bod výkonu modulu ( $P_{MPP}$ ) a jeho napětí naprázdno (VOC). Nevysvětlitelné ztráty výnosů tak mohou být příznakem PID. Vzhledem k tomu, že měření Rsh, MPP a IR vyžadují nákladné vybavení, tak nejjednodušším způsobem, jak zjistit PID je použít obyčejný voltmetr pro měření VOC. Rozsah PID může být odhalen vynesemím měření VOC polohou panelu ve stringu nebo srovnáním měření VOC u panelů z opačných konců stringu. [11]

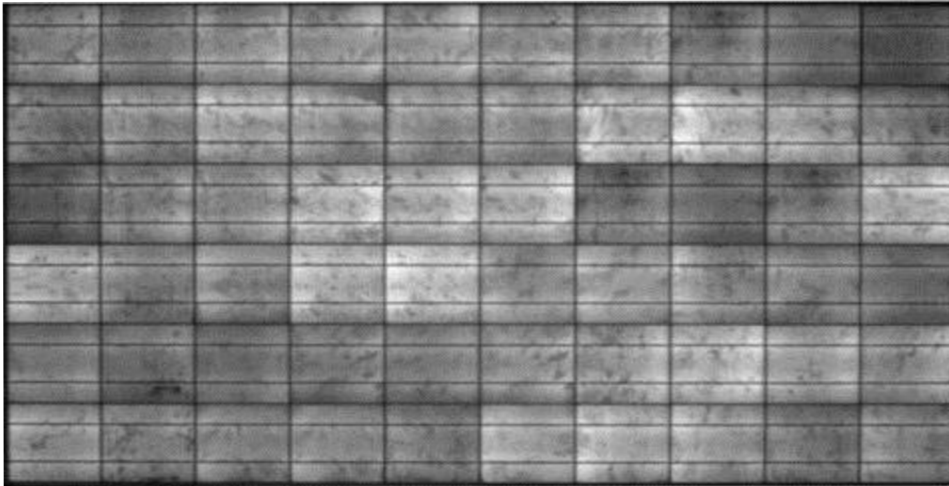


**Obr. 4.4:** Polarizační účinek na c-Si moduly mohou být zcela zvráceny obrácením potenciální napětí [11]

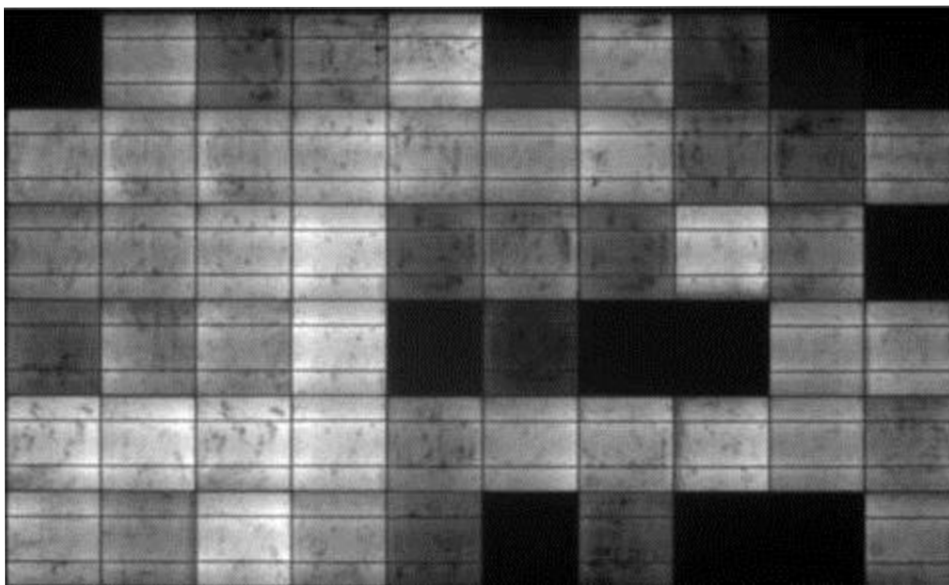
Účinek PID může být buď ireverzibilní nebo reverzibilní, v závislosti na jeho příčině. Je zřejmé, že nevratný účinek je mnohem vážnější a vyžaduje okamžitou detekci a řešení. Nevratný PID je obvykle způsoben elektrochemickou reakcí, která vede k elektrokorozí nebo delaminaci fólie na FV modulech. Tyto nevratné charakteristiky byly dokumentovány především u tenkovrstvých technologií. [11]

Reverzibilní forma PID, také známá jako „povrchová polarizace“ nebo „polarizační efekt“, byla objevena v roce 2005. Jde o povrchovou polarizaci, která vytváří destruktivní a reverzibilní hromadění statického náboje na povrchu vysoce účinných solárních článků. Rozsáhlé testování prokázalo schopnost zvrátit polarizační efekt a tím plně obnovit původní výkon modulů. Test,

jehož výsledky jsou znázorněny na obrázku 4, zjistil, že přivedením opačné polarity dosáhneme zvrácení polarizačního jevu, a to ve velmi rychlém čase. Je patrná počínající degradace FV článků vlivem PID. V luminiscenčním zobrazení se tento jev projevuje ztmavnutím FV článků převážně kolem rámu FV modulu. [11]



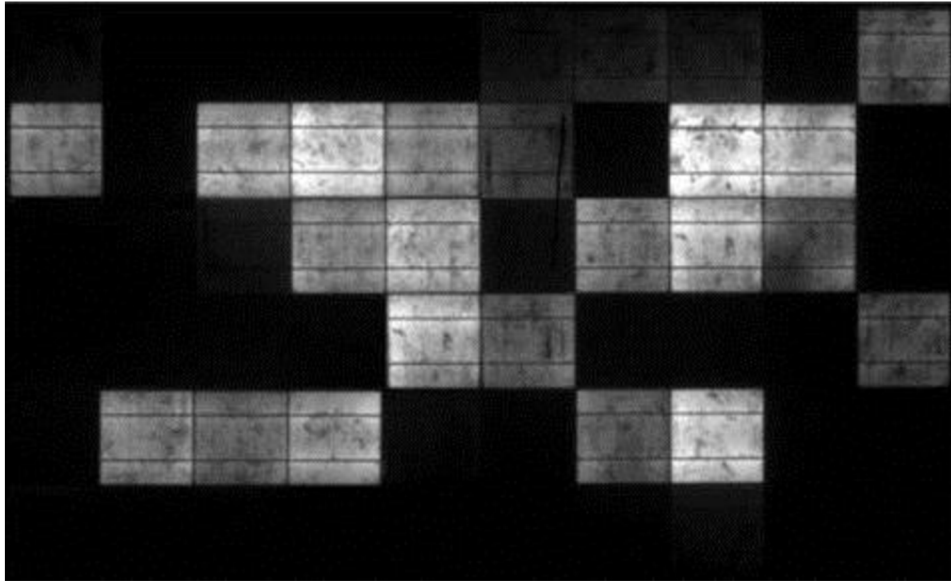
**Obr. 4.5** Obrázek zobrazující ztrátu výkonu způsobenou PID (Ztráta výkonu o 9 %) [11]



**Obr. 4.6** Obrázek zobrazující ztrátu výkonu způsobenou PID (Ztráta výkonu o 36 %) [11]

Pokročilejší degradace FV článků vlivem PID. Jsou zasaženy FV články na více než třetině plochy. U některých FV článků degradace pokročila natolik, že již neprodukují žádný výkon – černé články. [11]





**Obr. 4.7** Obrázek zobrazující ztrátu výkonu způsobenou PID (Ztráta výkonu o 67 %) [11]

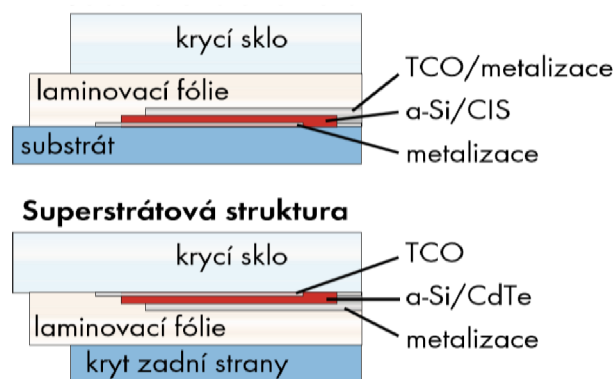
Na snímku je patrná velmi pokročilá degradace FV článků vlivem PID. Degradací jsou zasaženy FV články téměř na celé ploše, největší poškození je vidět po obvodu rámu. PID degradace je již tak pokročilá, že ztráta výkonu činí přes 2/3 původních hodnot. [11]

#### 4.4 Koroze TCO

Již po relativně krátké době provozu bylo v minulosti na některých tenkovrstvých panelech zjištěno poškození tzv. vrstvy TCO (Transparent Conductive Oxide). Poškození této elektricky vodivé vrstvy na vnitřní straně krycího skla je neopravitelné a způsobuje značné ztráty výkonu. [12]

#### Příčiny

Příčiny koroze TCO se zkoumají od roku 2000 v institutu Florida Solar Energy Center (FSEC). Zjistilo se tak, že postiženy jsou především FV panely s články z a-Si a CdTe vyrobené pomocí superstrátové technologie. Při tomto výrobním postupu se jednotlivé vrstvy FV panelu nanáší tak, že se začíná krycím sklem. Ke korozi TCO dochází v první řadě na okraji FV panelu při reakci vlhkosti se sodíkem, který je obsažen v krycím skle. V důsledku koroze získává vrstva TCO mléčné zbarvení a ztrácí své vodivé vlastnosti. Výkonnost FV panelu pak stále klesá. [12]



**Obr. 4.8** Substrátová struktura [12]

## Protiopatření

- Koroze bezprostředně závisí na ztrátových proudech. Ty zase závisejí na potenciálu FV generátoru vůči zemi. Na rozdíl od FV napětí mezi kladným a záporným pólem se na napětí vůči zemi při návrhu FV systémů téměř nedbá. Toto napětí se velmi liší v závislosti na topologii střídače. Ztrátové proudy lze mírně omezit maximalizací vzdálenosti mezi FV panely a uzemněnými konstrukcemi (např. rámem FV panelů). Nicméně jen výběrem určité topologie střídačů není možné tento problém vyřešit.
- Použitím střídače s galvanickým oddělením a uzemněním záporného pólu FV generátoru pomocí uzemňovací sady (objednací kód: ESHV-N-NR) vzniká elektrické pole, v němž jsou kladně nabití ionty sodíku odpuzovány od vrstvy TCO. Dochází tak ke spolehlivé prevenci koroze. Toto opatření by se mělo používat přednostně.
- Opatření, která tomuto efektu zabraňují, vyvíjejí také výrobci FV panelů. Například lepším zapečetěním hran FV panelů se zabrání vnikání vlhkosti, čímž se odstraní příčina korodování. [12]

## 4.5 Degenerace materiálu

### 4.5.1 Etylvinylacetát

Standardní termoplastický kompozit založený na EVA polymeru má řadu nevýhod spojených se stávajícími standardními konstrukcemi PV panelů. Je to zejména degradace, nestabilita optických vlastností v dlouhodobém provozu nebo při koncentrovaném slunečním záření, vznik těkavých látek během procesu tepelně vakuové laminace, komplikované použití vakuové techniky (aktivní kyslík, oxidy uhlíku, kyselina octová apod.), vysoký příkon během laminačního procesu cca 46 kW u standardních laminátorů. Degradace dosud používané EVA fólie bývá hlavním zdrojem poruch PV panelů, hlavní zdroje selhání jsou v tab. 3.1 [13]

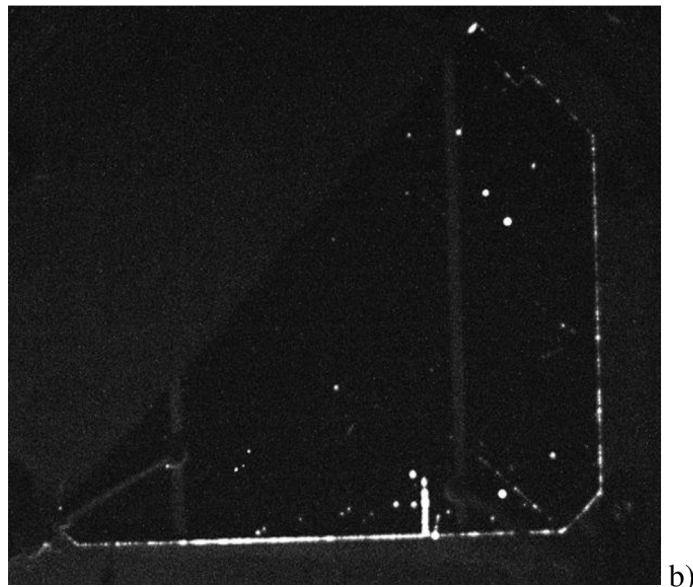
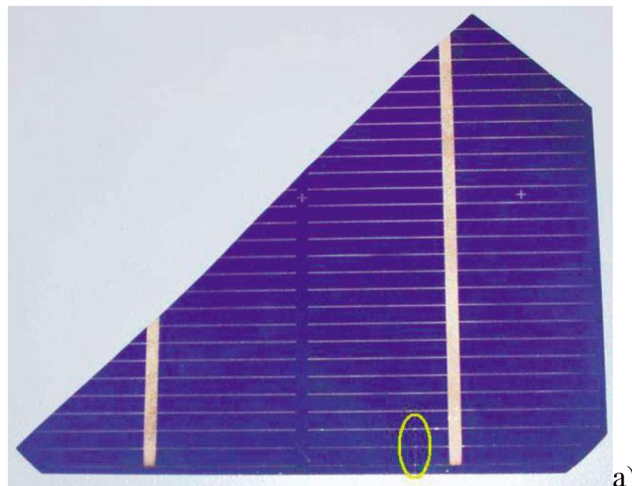
druh poruchy	četnost poruch (%)
degradace	45,3
přerušení propojení PV článků	40,7
chyba vyvedení výstupu	3,9
chyba J-boxu	3,6
delamination	3,4
overheated wires or diodes	1,5
mechanical damage	1,4
defective bypass diodes	0,2

Tab. 4.1 Druhy poruch slunečního panelu [13]



#### 4.5.2 Defekty krystalové mřížky

Defekty, které zhoršují elektrické vlastnosti krystalických křemíkových solárních článků, mají charakter poruchy krystalické mřížky. Podle typu poruchy pak hovoříme o bodových poruchách (vakance – chybějící atom, intersticiální částice – částice mimo pravidelný bod mřížky, příměsi – cizí atomy v krystalu), čárových poruchách (dislokační čáry – chybějící celé souvislé skupiny částic), plošných a objemových poruchách (precipitáty – ostrůvky jiné krystalické struktury). Většina těchto poruch ovlivňuje elektrické parametry. Ne všechny jsou samozřejmě nežádoucí. Díky různým příměsím lze měnit typ polovodiče z intrinsického na n nebo p typ. Bohužel některé defekty zvyšují rekombinaci, zkracují dobu životnosti a jinak brání využití světelné energie pro vykonání elektrické práce. [14]

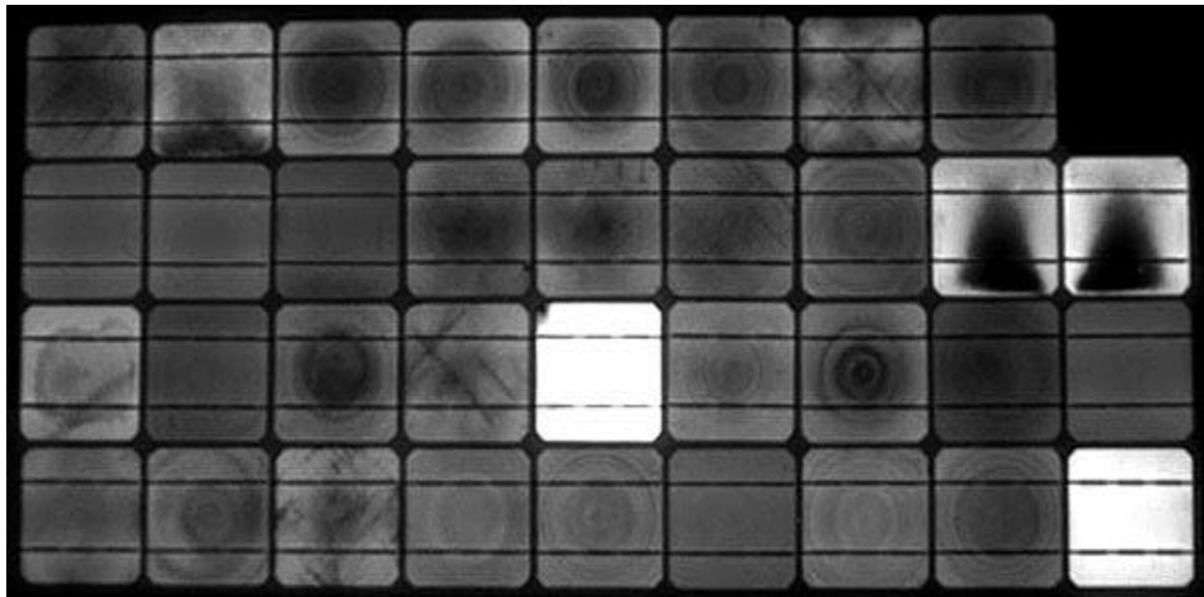


**Obr. 4.9 a,b** Mechanické poškození fotočlánků a) Zřetelní obraz b) Fotoluminiscenční obraz [14]

Tyto defekty je potřeba lokalizovat a v technologickém procesu zabránit jejich vzniku. Podle původu defektů je můžeme rozdělit na defekty materiálové, které vznikají při výrobě substrátu a polovodičových struktur průnikem nečistot, a procesní, způsobené mechanickým nebo jiným poškozením v průběhu technologického procesu. [14]

### 4.5.3 Elektroluminiscence

Elektroluminiscence je fyzikální děj, kdy při průchodu elektrického proudu polovodičovým přechodem dochází k emitování světelného záření. Z hlediska optických vlastností polovodiče můžeme rozdělit polovodiče na polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem a s nepřímým mezipásmovým přechodem. U polovodičů s přímým mezipásmovým přechodem, jako je GaAs, při rekombinaci páru elektron–díra je vysoká pravděpodobnost vyzáření fotonu o energii rovnající se šířce zakázaného pásu v místě přímého přechodu. Této vlastnosti se využívá u LED diod a polovodičových laserů. U polovodičů s nepřímým mezipásmovým přechodem se při generačně-rekombinačních dějích kromě energie fotonů účastní i fonony (tepelné kmity krystalografické mřížky). Z tohoto důvodu tyto materiály nejsou vhodné pro optoelektroniku. Přestože je pravděpodobnost vyzáření fotonu při rekombinačních dějích u těchto polovodičů nižší a je tu větší neurčitost energie vyzářeného fotonu, lze tuto metodu použít pro generování světelné emise a s její pomocí analyzovat struktury polovodičových přechodů P-N, jako jsou solární články. [14]



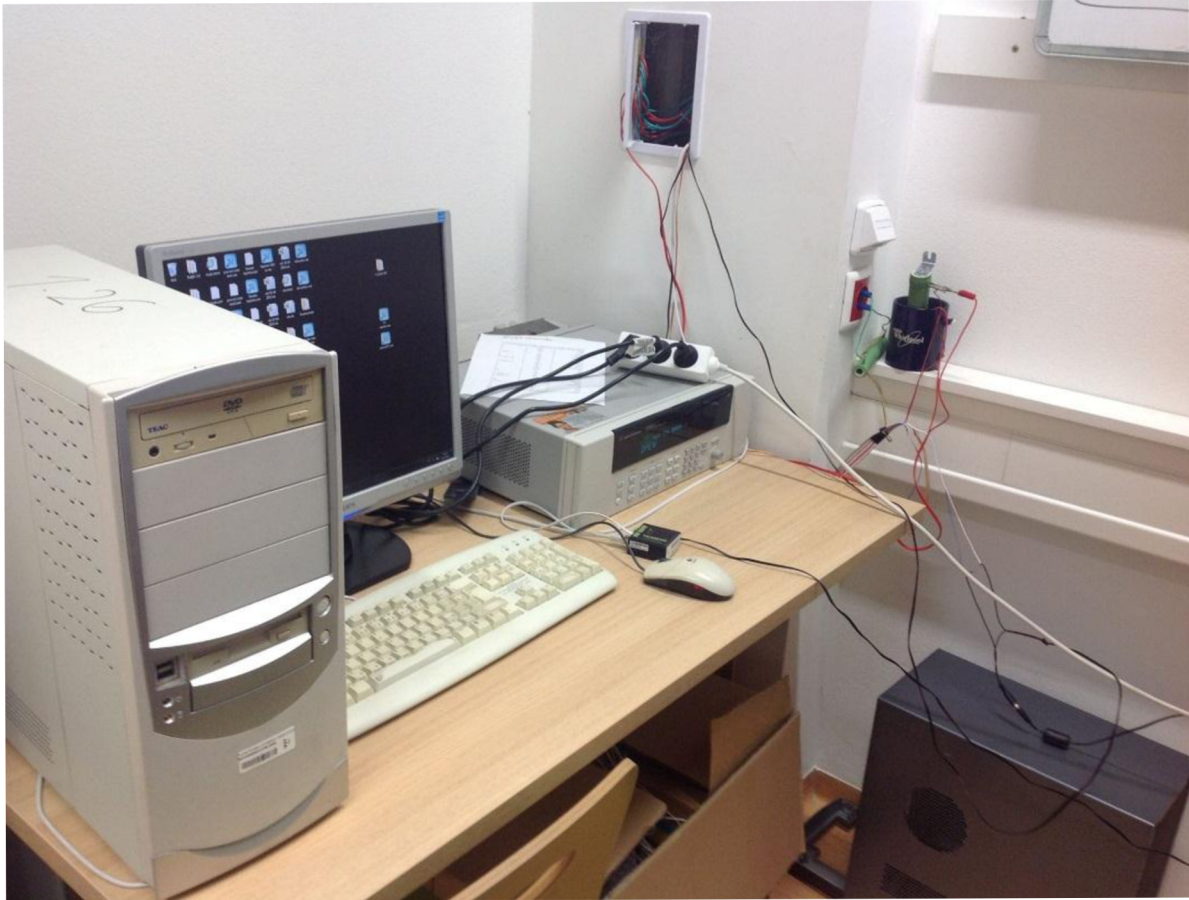
Obr. 4.10 Panel s vadnými fotočlánky [14]

Ideální solární článek by měl vykazovat konstantní proudovou hustotu v celé ploše přechodu, a tím i jeho vyzářené světlo by mělo mít na celé ploše stejnou intenzitu. Místa s nižší intenzitou světla (malé tmavší body) indikují poruchu ve struktuře materiálu (nehomogenita difuzní vrstvy přechodu P-N). Porucha může být dána nepravidelností ve struktuře monokrystalu. Naopak výrazně světlejší místa znázorňují oblasti s vyšší proudovou hustotou. Jak je vidět na snímcích, jde většinou o místa blízko kontaktů solárního článku. [14]

## 5.0 Praktická část.

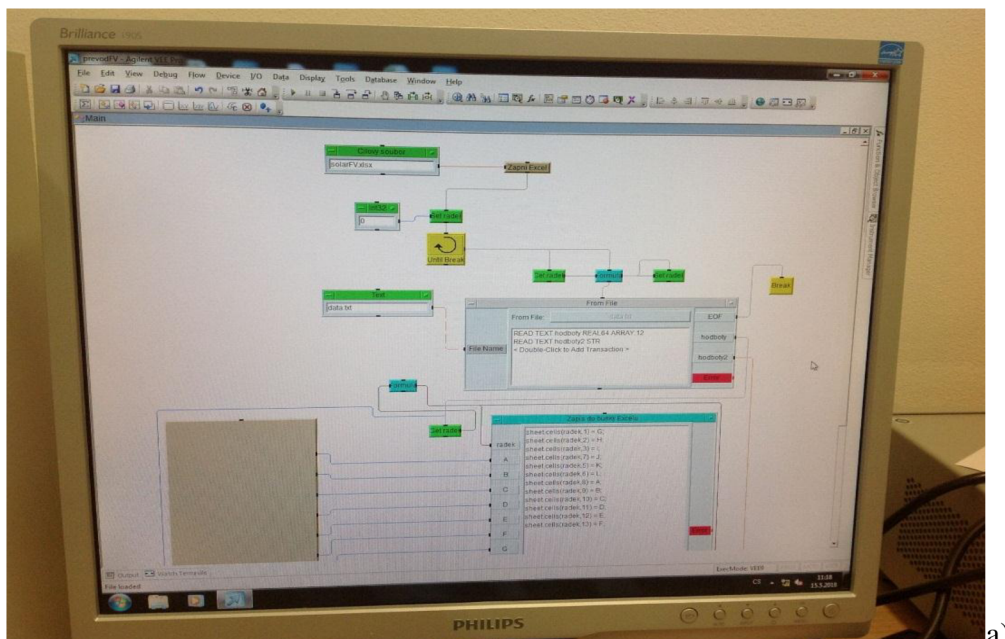
### 5.1 Měření a vyhodnocování parametrů fotovoltaického panelu.

V naše práce jsme použili speciální měřicí software pomoci, kterého jsme prováděli měření. Software vypadal následovně:

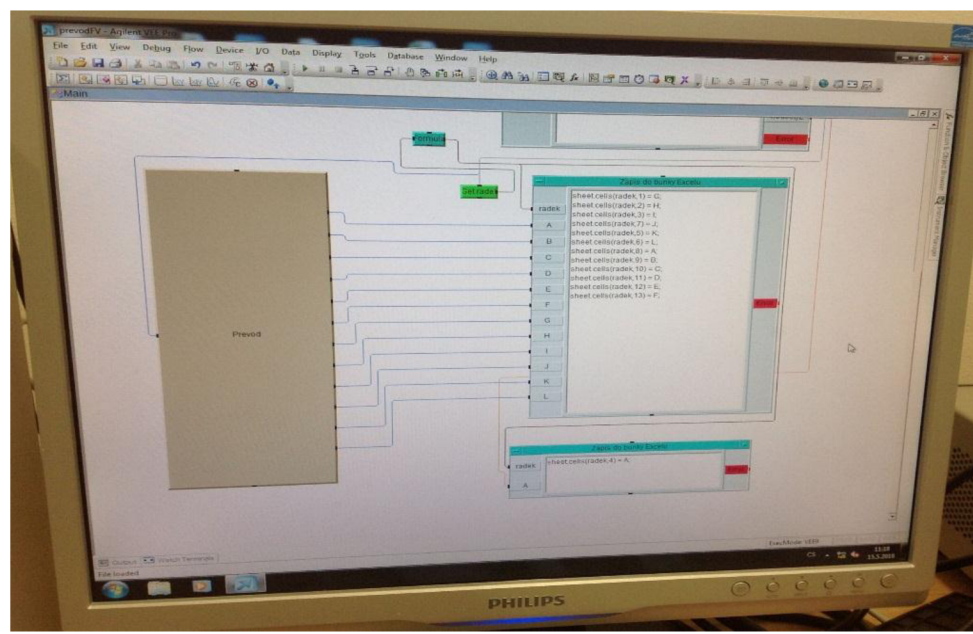


Obr. 5.1 Měřicí hardware





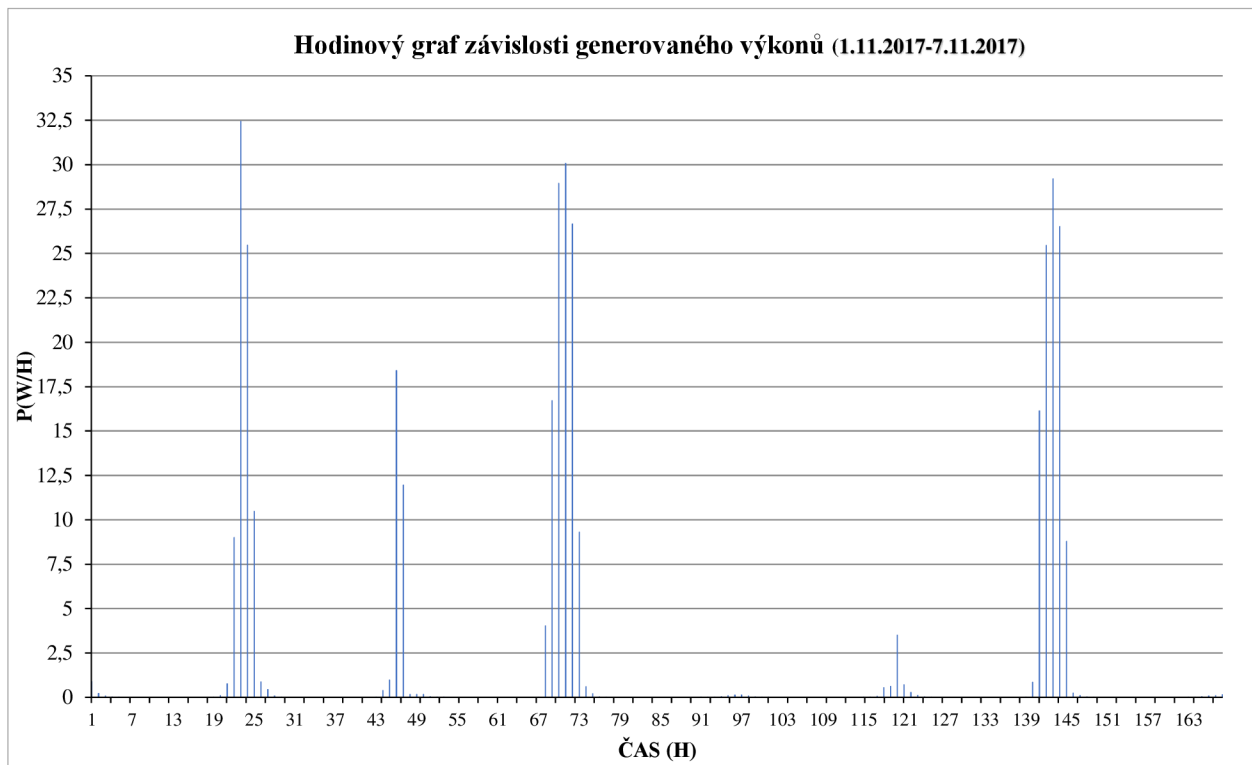
a)



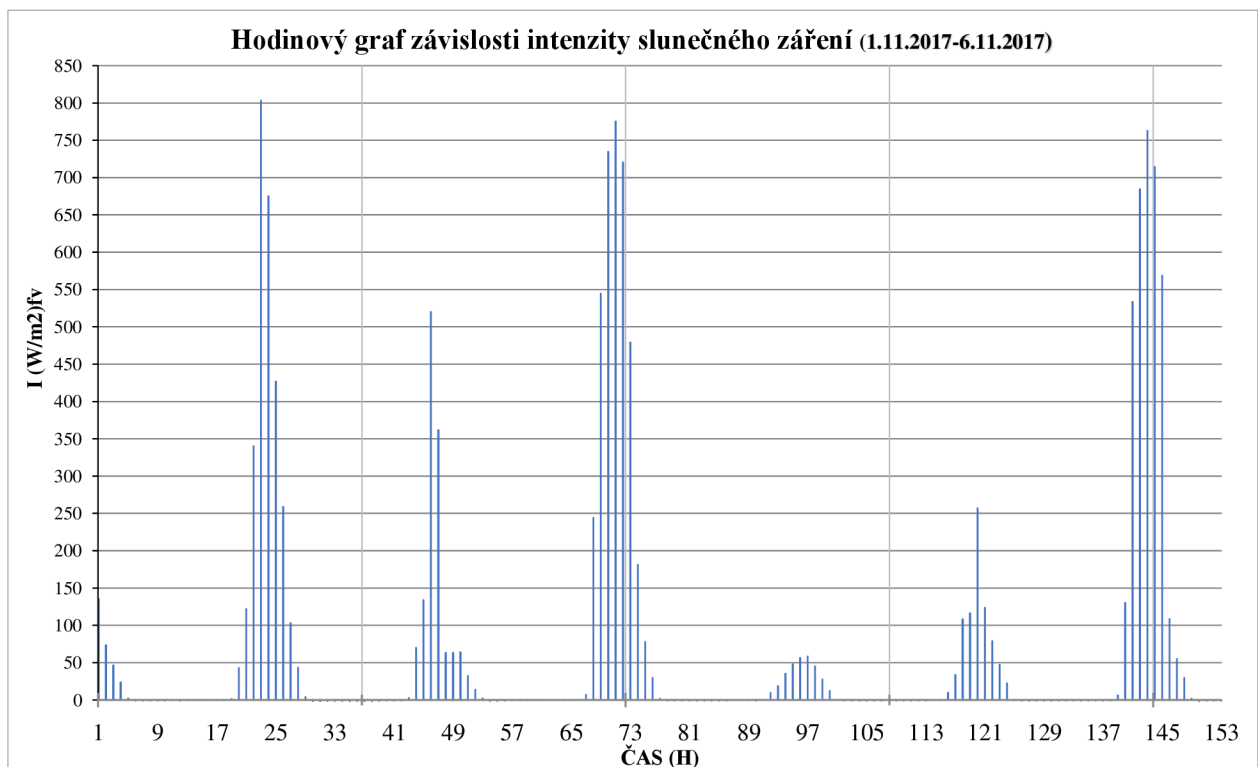
b)

Obr. 5.2 a,b Měřicí software

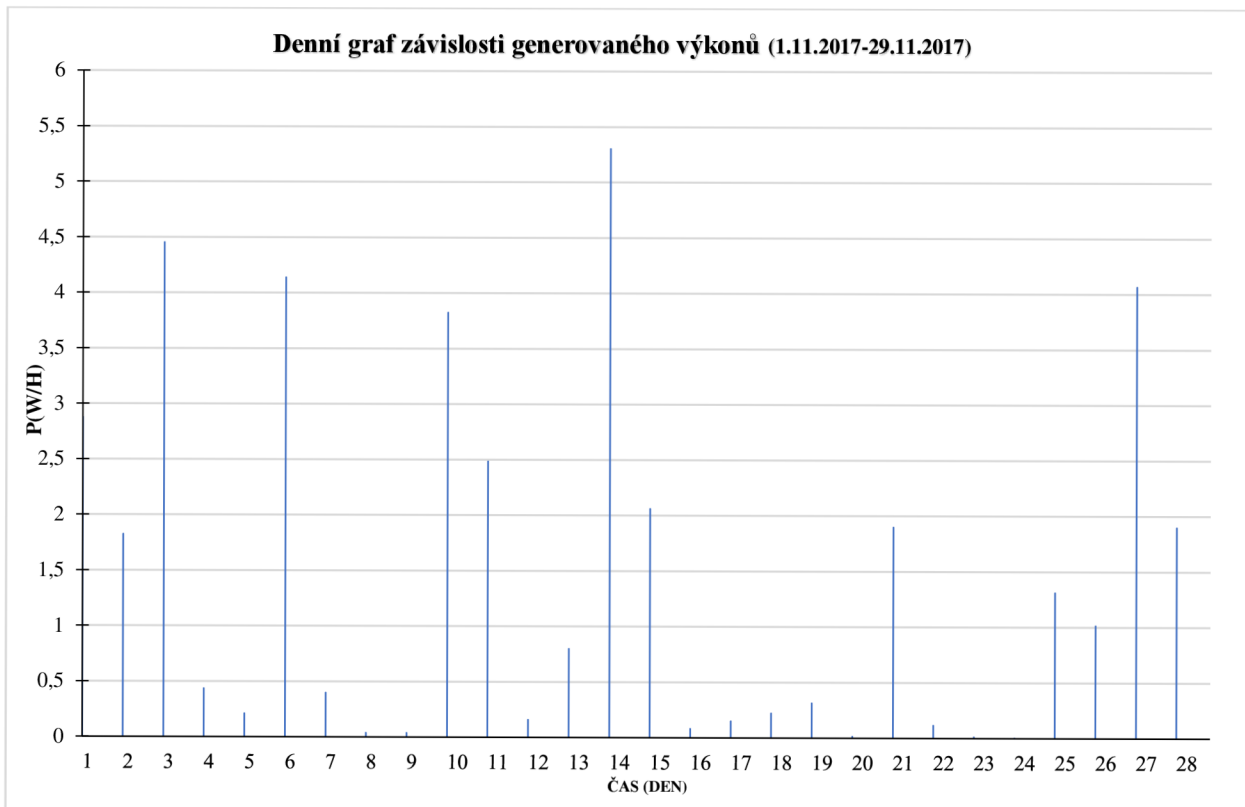
Panely byli zapojeni ve třech různých zapojení: panely Atersa 10319, 10344 byli zapojeni nakrátko a naprázdno, pro poslední panel RoHS jsme použili zátěž, kterou jsme zapojili sériově. Pro uvedení panel jsme vypočítali vhodnou hodnotu odporu, která odpovídala odporu v bode maximálního výkonu. Jako zátěž jsme použili žárovku OSRAM 64642 HLX 150 W 24 V G6.35. Panel Atersa 10344 jsme následně připojili pomoci aktivní zátěži k měřicímu softwaru. Pomoci softwaru jsme fixovali veškeré parametry hlavní, ze kterých jsou intenzita slunečního záření a napětí generované panelem za jednotlivé časové úseky (10 min). Pomoci naměřených hodnot napětí a při známe hodnotě odporu jsme vypočítali výkon generovaný panelem. Z následujících hodnot jsme sestavili grafy proměnného výkonu za jednotlivé denní, týdenní, měsíční časové úseky.



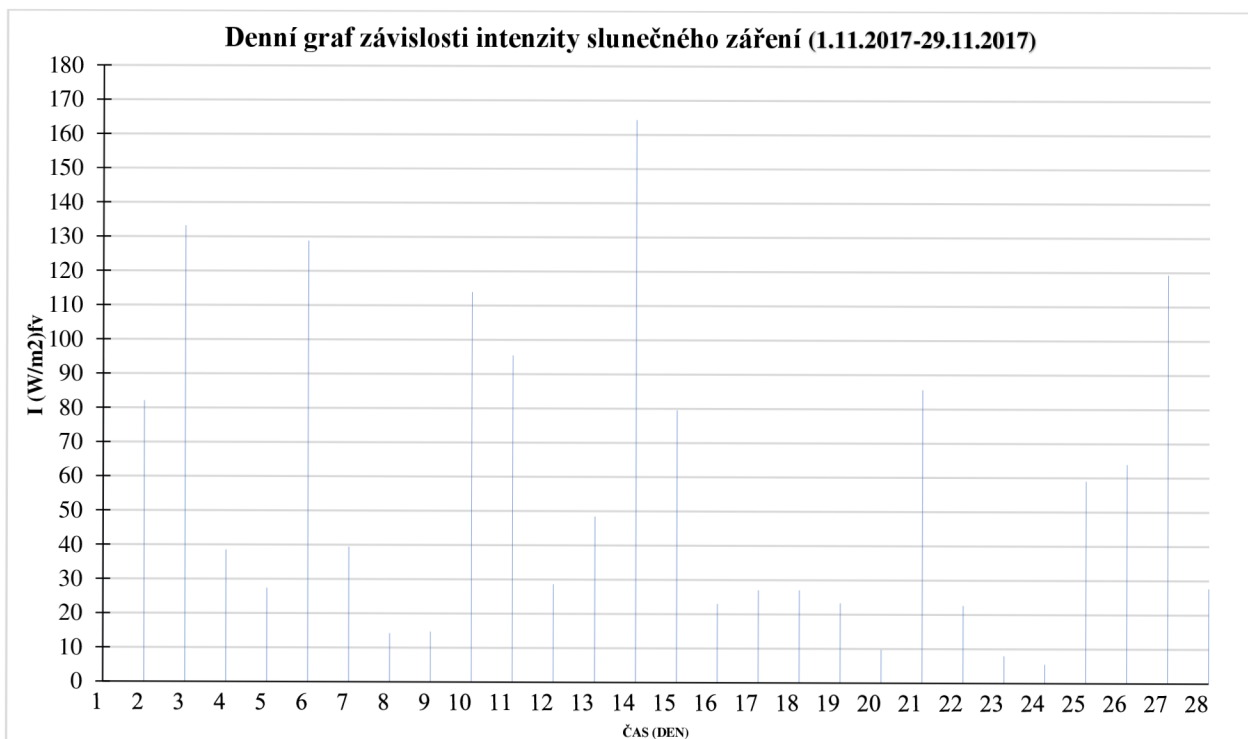
**Obr. 5.3** Hodinový graf závislosti generovaného výkonů



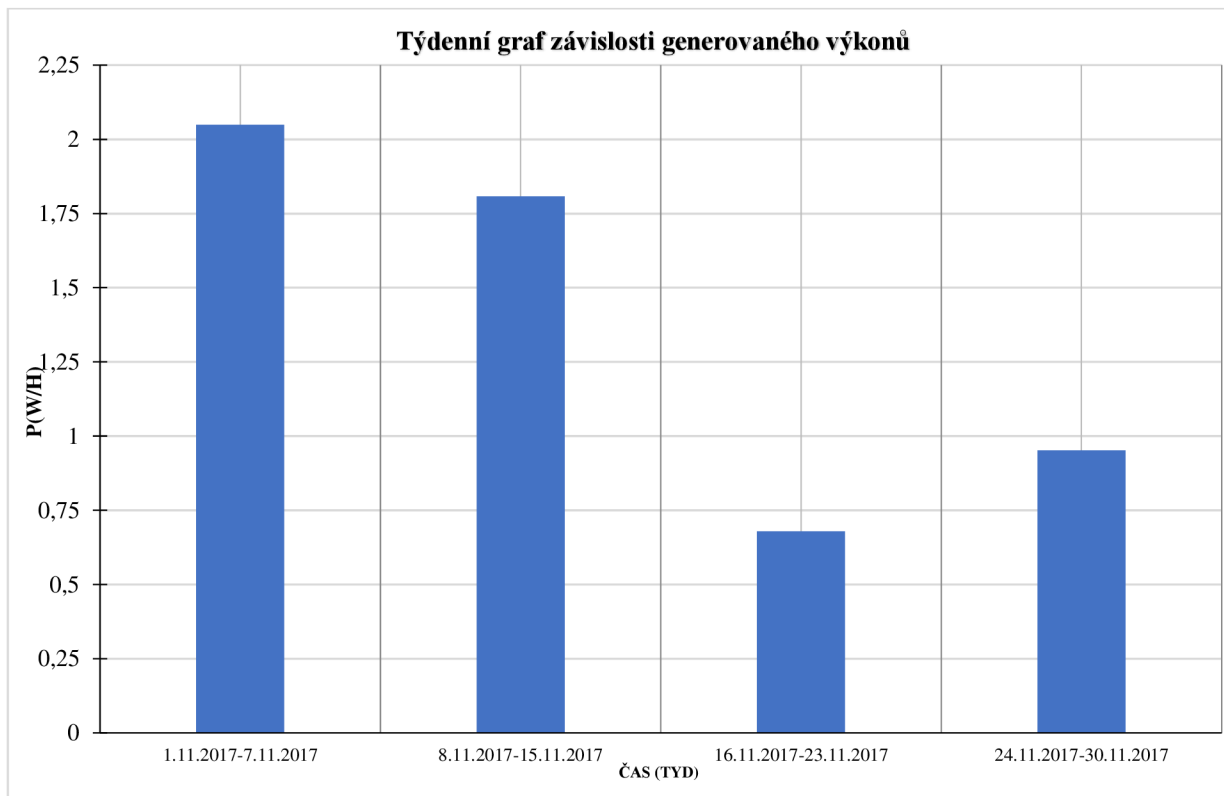
**Obr. 5.4** Hodinový graf závislosti intenzity slunečního záření



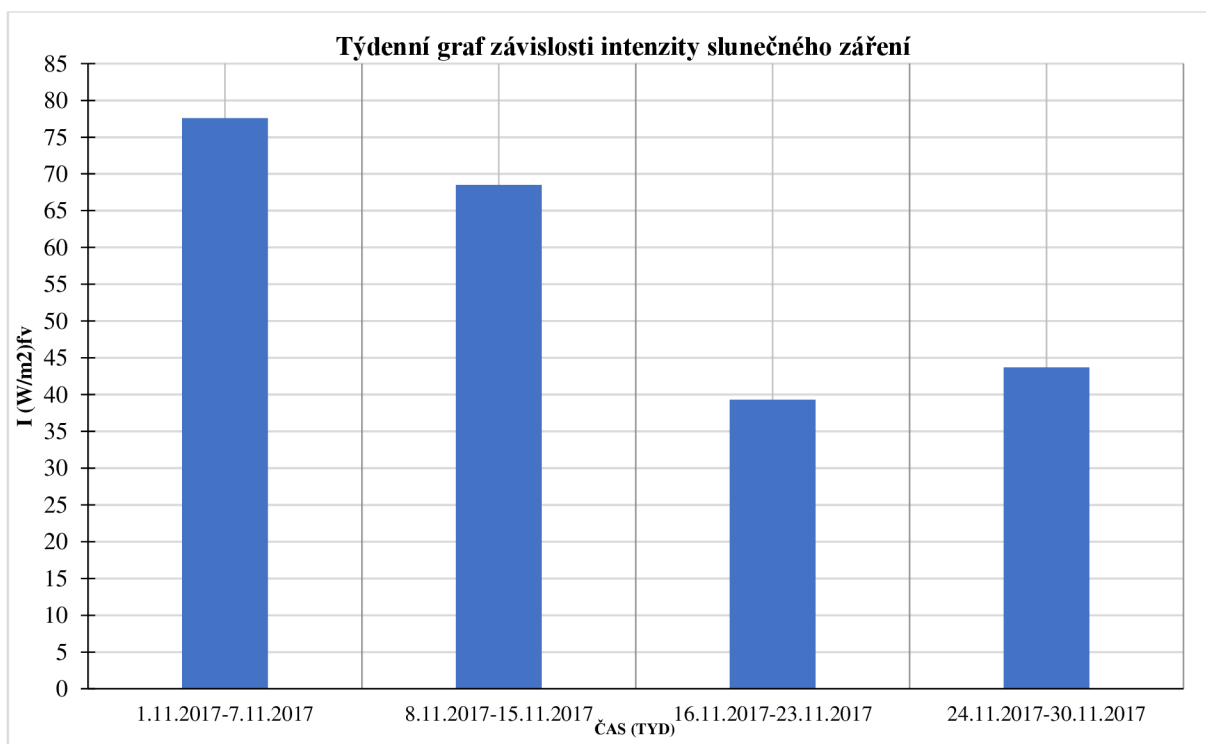
**Obr. 5.5** Denní graf závislosti generovaného výkonů



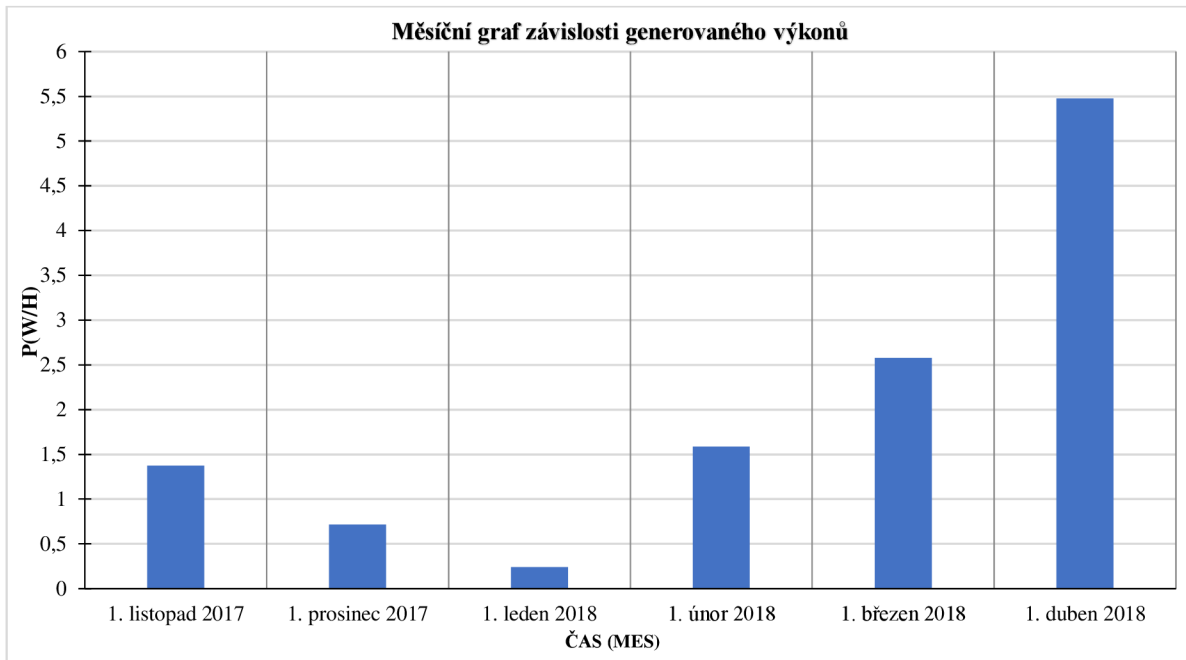
**Obr. 5.6** Denní graf závislosti intenzity slunečního záření



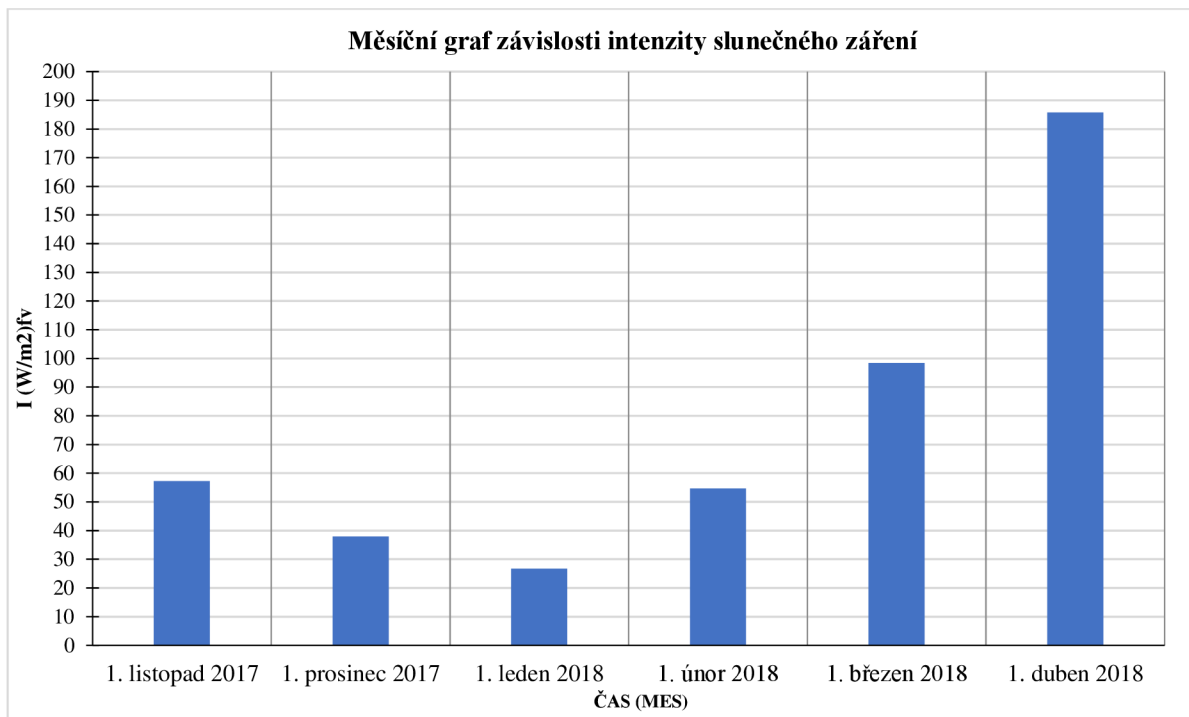
**Obr. 5.7** Týdenní graf závislosti generovaného výkonu



**Obr. 5.8** Týdenní graf závislosti intenzity slunečního záření



**Obr. 5.9** Měsíční graf závislosti generovaného výkonů



**Obr. 5.10** Měsíční graf závislosti intenzity slunečního záření

Z uvedených grafů závislosti generovaného výkonů se dá odečíst, že největší výkon byl generován panelem za duben.

Za ostatní měsíce generovaný výkon byl menší, což je způsobeno hodnotou slunečných dnů v jednotlivých měsících.



**Příklad vypočtu:**

$$R_d = 3,66\Omega ; U_{gen} = 2,765V ;$$

$$P = \frac{U_{gen}^2}{R_d} ; P = \frac{2,765^2}{3,66} ; P = 2,09W$$

$$P_H = \frac{(P_{1:10} + P_{2:10} + P_{3:10} + P_{4:10} + P_{5:10} + P_{6:10})}{6} ;$$

$$P_{1:10} = 2,09 W ; P_{2:10} = 0,99 W ; P_{3:10} = 0,9 W ;$$

$$P_{4:10} = 0,69 W ; P_{5:10} = 0,52 W ; P_{6:10} = 0,19 W ;$$

$$P_H = \frac{(2,09 + 0,99 + 0,9 + 0,69 + 0,52 + 0,19)}{6} ;$$

$$P_H = 0,895 W/hod$$

$$P_{den} = (P_{1:1} + P_{1:2} + P_{1:3} + P_{1:4} + P_{1:5} + P_{1:6} + P_{1:7} + P_{1:8} + P_{1:9} + P_{1:10} + P_{1:11} + P_{1:12} + P_{1:13} + P_{1:14} + P_{1:15} + P_{1:16} + P_{1:17} + P_{1:18} + P_{1:19} + P_{1:20} + P_{1:21} + P_{1:22} + P_{1:23} + P_{1:24})/24;$$

$$P_{den} = (0,894 + 0,231 + 0,092 + 0,038 + 0,00078 + 2,4416E-09 + 2,551E-10 + 1,0107E-10 + 1,565E-10 + 1,707E-10 + 1,358E-10 + 1,089E-10 + 7,1609E-11 + 5,198E-11 + 4,00E-11 + 2,015E-11 + 1,647E-11 + 7,4855E-11 + 0,0007514 + 0,09980 + 0,7777 + 9,0112 + 32,43 + 25,47) / 24;$$

$$P_{den} = 2,88 W/hod;$$

$$P_{tyden} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7)}{7} ; P_{tyden} = \frac{2,88 + 1,83 + 4,45 + 0,44 + 0,21 + 4,14 + 0,40}{7} ;$$

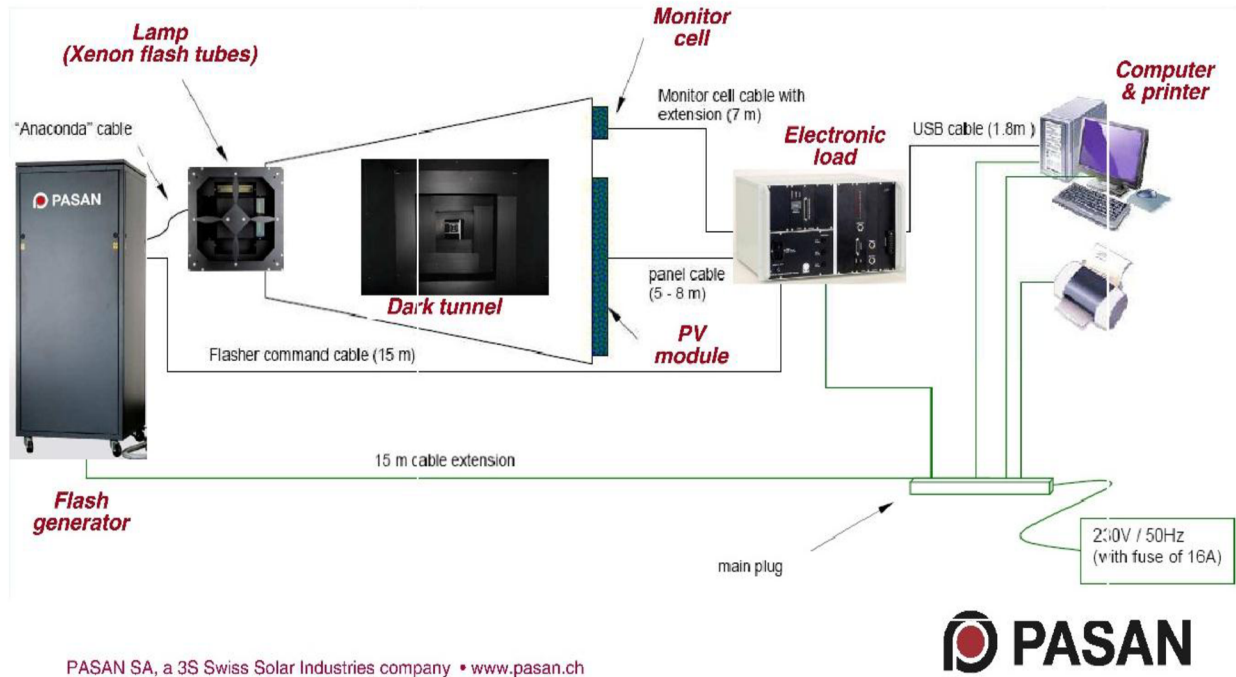
$$P_{tyden} = 2,05 W/hod;$$

$$P_{mesic} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{4} ; P_{mesic} = \frac{2,05 + 1,81 + 0,68 + 0,95}{4} ;$$

$$P_{mesic} = 1,37 W/hod;$$

## 5.2 Měření Volt–Amperových charakteristik a zastínění.

Pro vyhodnocování a měření Volt–Amperových charakteristik jsme použili sluneční simulátor Flash tester PASAN SUN SIM 3 C:

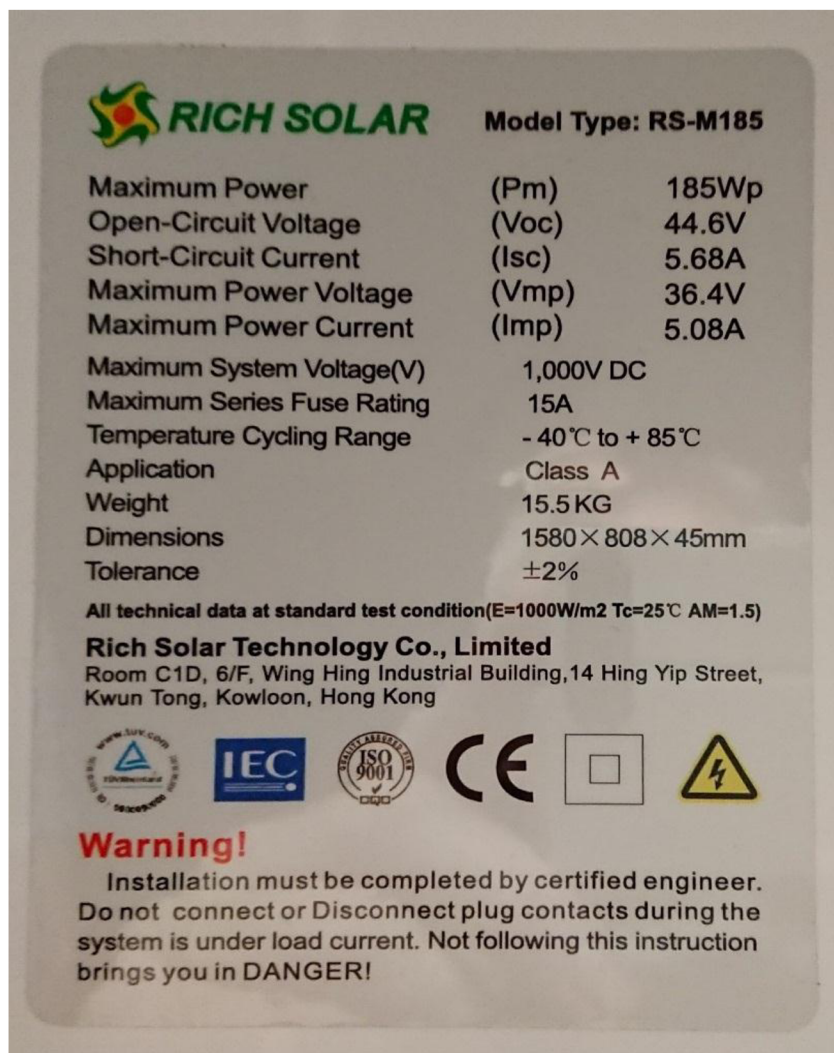


Obr 5.11 Zapojení PASAN SUN SIM 3 C



Obr. 5.12 Pracoviště PASAN SUN SIM 3 C

Pomocí uvedeného zařízení jsme prováděli měření Volt–Amperově charakteristiky a zastínění zkušební panelu. Jako zkušební panel jsme použili panel Rich Solar.



Obr. 5.13 Štítek panelu

Když solární článek se zastíní vzniká spatná vazba a proud začne protékat přes zastínění článek a rozptýlit se jako teplo, a tím pádem vznikají tak zvaná horka místa. Pro ochranu solárních panelu jsou mezi jednotlivé části panelu instalovány bypassové diody. Pokud panel funguje správně, dioda zůstává neaktivní. Jakmile panel začíná fungovat špatně, dioda mění svou polaritu (otevřít se) a začne odvádět přebytečný proud od vadného článku a efektivně chrání panel před vzniku horkých míst. Panel dočasně generuje o 25 % méně výstupního výkonu než při normálním provozu.



**Obr 5.14** Uspořádání diod

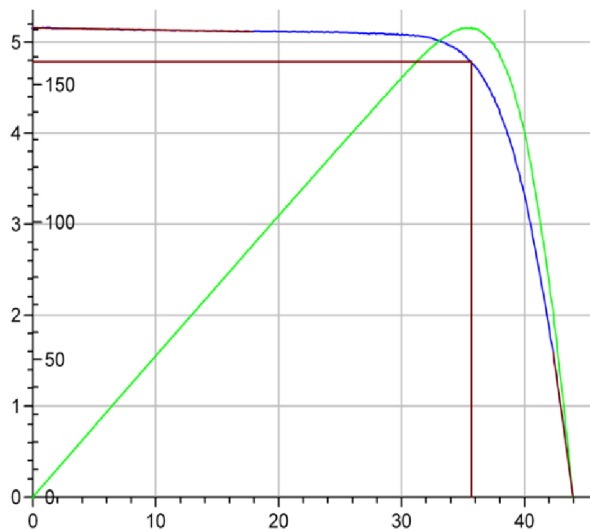
Panel jsme zastiňovali na různých pozicích a při různých ploškách fotovoltaického článku. Zastínění jsme prováděli pomoci papírových čtverečků:





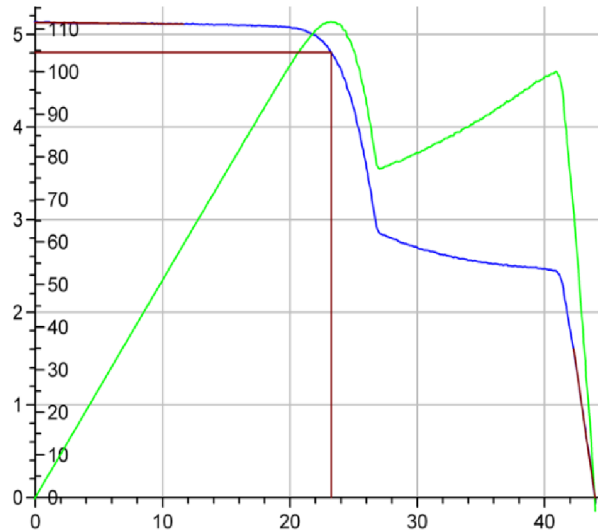
**Obr. 5.15** Zastínění panelu

Obvyklé v slunečném panele jsou namontované tři diody, jedna dioda zabezpečuje jeden stringeru. Pro pochopení, jak se mění výkon zkušebního panelu, budeme porovnávat parametry při zastínění a při normálním provozu.



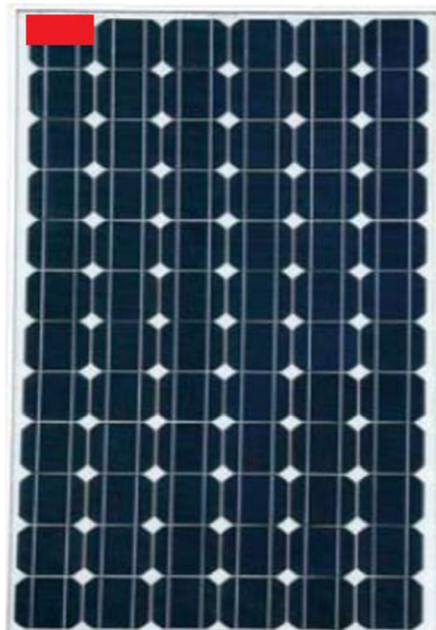
Obr. 5.16 Normální provoz

$P_{mpp} - 170.717 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 35.698 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 4.782 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 431.0 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 13.37\%$   
 $FF - 75.31\%$   
 $R_{ser} - 1.0 \text{ Ohm}$



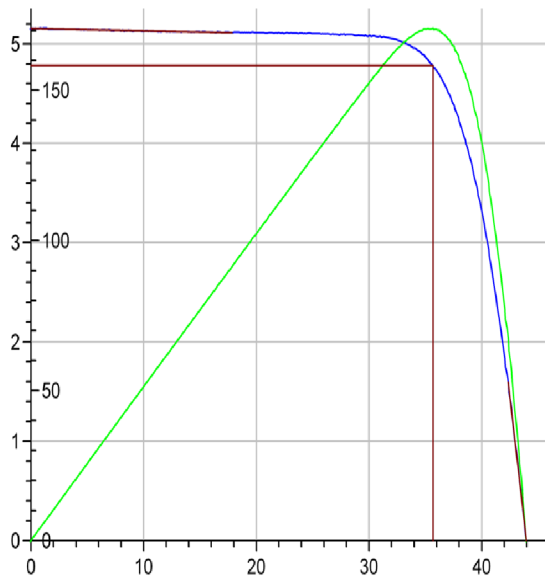
Obr. 5.17 Zastínění půlky fotočlánku na 1 stringeru

$P_{mpp} - 111.705 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 23.241 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 4.806 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 729.1 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 8.75\%$   
 $FF - 49.57\%$   
 $R_{ser} - 1.0 \text{ Ohm}$



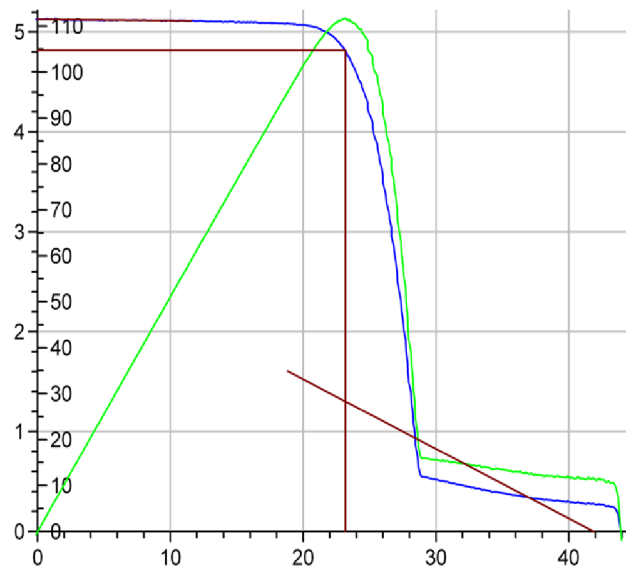
Obr. 5.18 Pozice zastíněného článku

V tomto případě zastínění článku přes něho poteče přebytečný proud, zaceň se otevírat dioda a odvádět zbytečný proud. Při zastínění půlky fotočlánku pokles generovaného výkonu vychází přibližně 35 % nebo ~59 W. Přičemž, jestli dioda bude úplně otevřena generovaný výkon klesne o přibližně 35 % a při větších zastíněních plochách na stejném stringeru pokles výkonu se ustali na 33 %. Stejná situace platí u ostatních diod.



Obr. 5.19 Normální provoz

$P_{mpp} - 170.717 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 35.698 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 4.782 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 431.0 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 13.37\%$   
 $FF - 75.31\%$   
 $R_{ser} - 1.0 \text{ Ohm}$



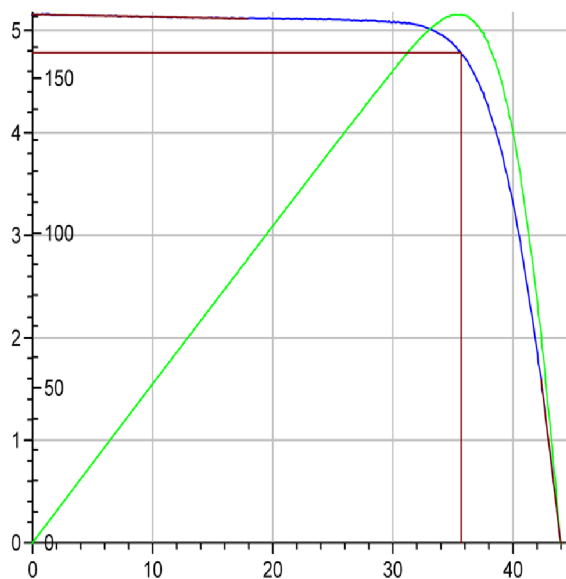
Obr. 5.20 Zastínění celého fotočlánku na 1 stringeru

$P_{mpp} - 111.637 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 23.179 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 4.816 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 719.6 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 8.74\%$   
 $FF - 52.01\%$   
 $R_{ser} - 14.4 \text{ Ohm}$



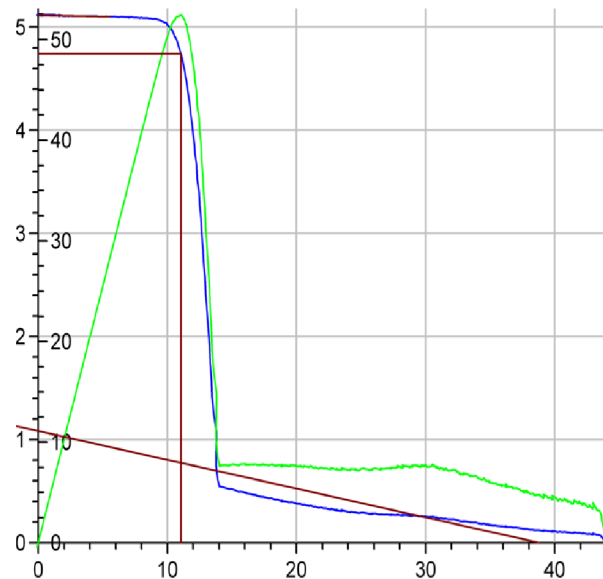
Obr. 5.21 Pozice zastíněného článku

V tomto případě pokles výkonů se ustali na 35 % a dioda zabezpečující příslušný stinger je úplně otevřena.



**Obr. 5.22** Normální provoz

$P_{mpp} - 170.717 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 35.698 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 4.782 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 431.0 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 13.37\%$   
 $FF - 75.31\%$   
 $R_{ser} - 1.0 \text{ Ohm}$



**Obr. 5.23** Zastínění celého článku na 1 a 2 stringerech

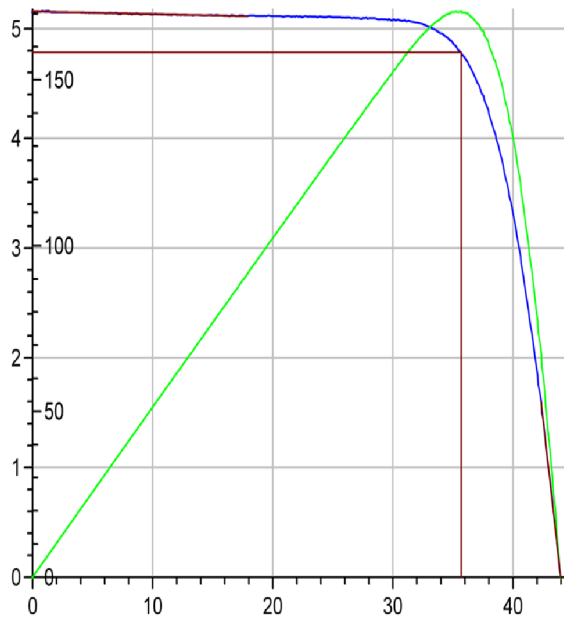
$P_{mpp} - 52.442 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 11.057 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 4.743 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 366.1 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 4.11\%$   
 $FF - 26.39\%$   
 $R_{ser} - 35.8 \text{ Ohm}$



**Obr. 5.24** Pozice zastíněného článku

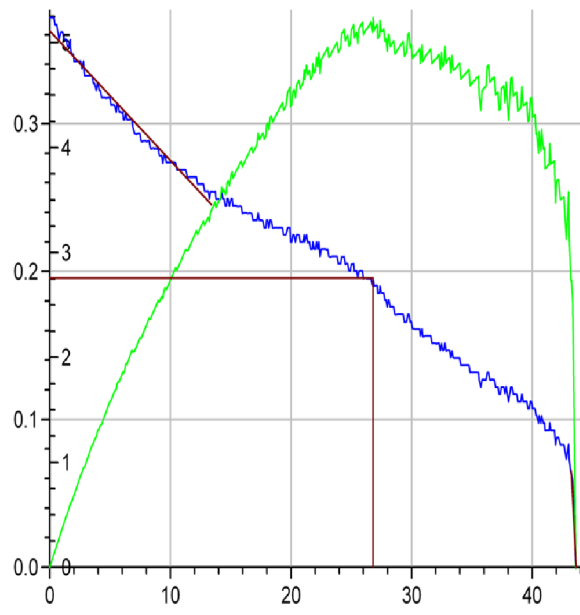
V tomto případě začne se otevírat druhá dioda u druhého stringeru a tady je pokles výkonů je mnohem větší přibližně 70 %.





Obr. 5.25 Normální provoz

$P_{mpp} - 170.717 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 35.698 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 4.782 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 431.0 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 13.37\%$   
 $FF - 75.31\%$   
 $R_{ser} - 1.0 \text{ Ohm}$



Obr. 5.26 Zastínění celého článků na 1, 2, stringerech

$P_{mpp} - 5.238 \text{ W}$   
 $U_{mpp} - 26.798 \text{ V}$   
 $I_{mpp} - 0.195 \text{ A}$   
 $R_{sh} - 114.2 \text{ Ohm}$   
 $Eff - 0.41\%$   
 $FF - 33.10\%$   
 $R_{ser} - 6.5 \text{ Ohm}$



Obr. 5.27 Pozice zastíněného článku

V posledním případě všechny diody jsou otevřeny a panel prakticky ne generuje zadní výkon což se da odečíst z Volt–Amperově charakteristiky.

## 6 Závěr

Během semestrální a bakalářské práce naším cílem bylo seznámení s principem činnosti fotovoltaického panelu a jakým způsobem se změní parametry panelu kvůli degradaci při dlouhodobém sledování.

Pomocí speciálního softwaru a hardwaru jsme prováděli dlouhodobé měření intenzity i generovaného výkonu. Měření jsme prováděli za jednotlivé desetiminutové úseky, byli sledovanými takovými hlavními parametry jako intenzita slunečního záření a generované napětí. Při známosti hodnotě generovaného napětí a dynamické zátěži jsme vypočítali výstupní výkon. Za doby našeho sledování, která trvala šest měsíců jsme sestavili grafy změny generovaného výstupního výkonu za jednotlivé časové období (den, týden, měsíc). Podle grafu, zkušební panel Artesta vykazoval největší produktivitu v dubnu, za duben panel generoval průměrně 5,5 Wattů za hodinu.

Hlavním nástrojem pro sledování degradace a defektu slunečního panelu je Volt–Amperova charakteristika. V naší práci jsme skousli imitovat mrtvé články pomocí papírových čtverečků. Následně jsme skouslo odhadnout pomocí Volt– Amperově charakteristiky v jakých místech se nacházeli zastíněny články. Hlavní věc, kterou jsme stanovili je to že pomocí Volt–Amperově charakteristiky se nedá odhadnout pozice vadného článku akorát celkovou plochu nefunkčních článků.

Za celou dobu naše analýzy zkušební panely neprokázali praktické zadané změny parametru při prvním a při posledním měření, což nám říká že solární panely jsou dlouhodobě spolehlivé.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] *Přeměna sluneční energie v energii elektrickou* [online] <https://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>
- [2] *PÁSOVÉ DIAGRAMY* [online] <http://www.trunky.cz/bp/fypolo/4.htm>
- [3] *VLIV TEPLoty NA PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ s 2,3* [online] [http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnkaklik&path=%2Fdokumenty%2Fskolni%2FEZF%2FFotovoltaiicke\\_clanky%2Fmereni3%2Fzadani.pdf&sc=1](http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnkaklik&path=%2Fdokumenty%2Fskolni%2FEZF%2FFotovoltaiicke_clanky%2Fmereni3%2Fzadani.pdf&sc=1)
- [4] *Technologie výroby fotočlánků* [online] <http://ust.su/solar/media/section-inner16/1831/>
- [5] *Schottky diody – zařízení, typy, vlastnosti a použití* [online] <http://electricalschool.info/electronica/1827-diody-shottki-ustrojstvo-vidy.html>
- [6] *Schottkyho dioda* [online] [http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke\\_soucastky/schottkyho\\_dioda.html](http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke_soucastky/schottkyho_dioda.html)
- [7] *Označení, použití a parametry Schottkyho diod* [online] <http://go-radio.ru/diod-schottky.html>
- [8] *Fotovoltaiické moduly a instalace fotovoltaiických elektráren pod kontrolou termokamer* [online] <http://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/fotovoltaiicke-moduly-a-instalace-fotovoltaiickych-elektren-pod-kontrolou-termokamer>
- [9] *Solární továrna* [online] <https://www.mondragon-assembly.com/solar-automation-solutions/solar-manufacturing-equipment/tabber-stringer/tabber-and-stringer-gts-18/>
- [10] *Etapy montování slunečního panelu* [online] <http://www.solbat.su/enciklopediya/production/>
- [11] *Pokles výkonu fotovoltaiických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu* [online] <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaiickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [12] *Panelová technika* [online] s 3,4 <http://files.sma.de/dl/7418/Duennschicht-TI-UCZ114630.pdf>
- [13] *Fotovoltaiické panely nové generace* [online] <http://ekn.cz/fotovoltaiicke-panely-nove-generace/>
- [14] *DIAGNOSTICKÉ METODY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ* [online] <https://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaiika/diagnosticke-metody-fotovoltaiickych-clanku>
- [15] *Co jsou to hot spots neboli horká místa?* [online] <http://www.cefas.cz/ostatni/co-jsou-to-hot-spots-neboli-horka-mista.html>
- [16] *Bypassová dioda* [online] <http://voltstab.ru/blog/spetsialnye-tipy-diodov/>

[17] *Vishay Semiconductor Diodes Division VS-10ETS12-M3* [online]  
<https://www.digikey.lu/product-detail/en/vishay-semiconductor-diodes-division/VS-10ETS12-M3/VS-10ETS12-M3-ND/4934262>

[18] *Vishay Dual Schottky Diode Module 45V-200A - VS-400CNQ045PBF* [online]

<https://www.ebay.co.uk/itm/Vishay-Dual-Schottky-Diode-Module-45V-200A-VS-400CNQ045PBF-/262667589684>

[19] *Schottkyho dioda* [online] <http://z-moravec.net/elektronika/diody/schottkyho-dioda/>

## 7 Seznam obrázků a grafů

<b>Obr 1.1</b> Pasový model křemíku. [2].....	8
<b>Obr 1.2</b> Sluneční spektrum po průchodu atmosférou. Současně je vyznačena absorpční hrana krystalického křemíku. [1].....	8
<b>Obr 1.3</b> Pásové schéma p-n přechodu krystalického křemíku za osvětlení (energie fotonů $h\nu$ ) s vyznačením hran vodivostního ( $E_c$ ) a valenčního ( $E_v$ ) pásu, šířky zakázaného pásu ( $E_g = E_c - E_v$ ), Fermiho hladin v polovodiči typu n i p a oblasti existence vnitřního elektrického pole (prostorového náboje). [1].....	9
<b>Obr 1.4</b> Schematické znázornění struktury křemíkového solárního článku se zanořenými kontakty na přední straně. Texturovaný povrch pro snížení reflexe a zvýšení "light trapping" efektu je vytvářen využitím anizotropního leptání křemíku na rovině $\langle 100 \rangle$ . Vrstva oxidu, případně nitridu křemíku je použita pro pasivaci povrchu křemíku a pro snížení reflexních ztrát. Zadní kontakt (Al) funguje jako zpětný reflektor. [1].....	10
<b>Obr 1.5</b> Klasická VA charakteristika fotočlánků [3].....	10
<b>Obr 2.1</b> Stringer mašina [9].....	13
<b>Obr 2.2 a,b,c,d,e,f,g,h</b> Jednotlivé etapy výroby slunečního panelu a) Pájení fotočlánků b) Formování stringeru c) Ukládání stringerů na vrstvu EVY a krycího skla d) Formování „sendviče“ e) Laminace f) Montáž rámu h) Montáž propojovacího boxu [10].....	13-14
<b>Obr 2.3 a,b</b> Výrobní laminatory [10].....	15
<b>Obr 3.1</b> Schematické znázornění závady na fotovoltaickém modulu[8].....	16
<b>Obr 3.2</b> Reálný snímek a termogram fotovoltaického modulu s vadnou buňkou. Na reálném snímku není žádná závada zjištělná[8].....	17
<b>Obr 3.3</b> Uspořádání fotovoltaického panelu[8].....	17
<b>Obr 3.4</b> Uspořádání schottkyho dioda[7].....	18
<b>Obr 3.5</b> Charakteristika a vzhled schottkyho diody[6].....	18
<b>Obr 3.6</b> Model VS-400CNQ045[18].....	18
<b>Obr 3.7</b> Model DO-201AD[7].....	19
<b>Obr 3.8</b> Pasová struktura schottkyho přechodu[5].....	19

<b>Obr 3.9</b> Model VS-10ETS12-M3[17].....	19
<b>Obr 4.1</b> Svodový proud je způsoben napět'ovým potenciálem a způsobují jej negativní (-) ionty migrující od polovodičů a pozitivní (+), ionty migrující z obalu skla a polovodičů a vnějšího prostředí [11].....	21
<b>Obr 4.2</b> Napět'ový potenciál závisí na systému uzemnění, což může mít tyto čtyři základní klasifikace [11].....	22
<b>Obr 4.3:</b> Jak je vidět zde snížení paralelního odporu ( $R_{sh}$ ) vede k poklesu maximálního pracovního bodu (MPP) a napětí naprázdno [11] .....	23
<b>Obr 4.4:</b> Polarizační účinek na c-Si moduly mohou být zcela zvráceny obrácením potenciální napětí [11].....	23
<b>Obr 4.5</b> Obrázek zobrazující ztrátu výkonu způsobenou PID (Ztráta výkonu o 9 %) [11].....	24
<b>Obr 4.6</b> Obrázek zobrazující ztrátu výkonu způsobenou PID (Ztráta výkonu o 36 %) [11]....	24
<b>Obr 4.7</b> Obrázek zobrazující ztrátu výkonu způsobenou PID (Ztráta výkonu o 67 %) [11].....	25
<b>Obr 4.8</b> Substrátová struktura [12].....	25
<b>Obr 4.9 a,b</b> Mechanické poškození fotočlánků a) Zřetelní obraz b) Fotoluminiscenční obraz [14].....	27
<b>Obr 4.10</b> Panel s vadnými fotočlánky [14].....	28
<b>Obr 5.1</b> Měřicí hardware.....	29
<b>Obr 5.2 a,b</b> Měřicí software.....	30
<b>Obr 5.3</b> Hodinový graf závislosti generovaného výkonů.....	31
<b>Obr 5.4</b> Hodinový graf závislosti intenzity slunečního záření.....	31
<b>Obr 5.5</b> Denní graf závislosti generovaného výkonů .....	32
<b>Obr 5.6</b> Denní graf závislosti intenzity slunečního záření .....	32
<b>Obr 5.7</b> Týdenní graf závislosti generovaného výkonů.....	33
<b>Obr 5.8</b> Týdenní graf závislosti intenzity slunečního záření.....	33
<b>Obr 5.9</b> Měsíční graf závislosti generovaného výkonů .....	34
<b>Obr 5.10</b> Měsíční graf závislosti intenzity slunečního záření .....	34

<b>Obr 5.11</b> Zapojení PASAN SUN SIM 3C.....	36
<b>Obr 5.12</b> Pracoviště PASAN SUN SIM 3C.....	36
<b>Obr 5.13</b> Štítek panelu.....	37
<b>Obr 5.14</b> Uspořádání diod.....	38
<b>Obr 5.15</b> Zastínění panelu.....	39
<b>Obr. 5.16</b> Normální provoz.....	40
<b>Obr. 5.17</b> Zastínění půlku fotočlánku na 1 stringeru.....	40
<b>Obr. 5.18</b> Pozice zastíněného článku.....	40
<b>Obr. 5.19</b> Normální provoz.....	41
<b>Obr. 5.20</b> Zastínění celého fotočlánku na 1 stringeru.....	41
<b>Obr. 5.21</b> Pozice zastíněného článku.....	41
<b>Obr. 5.22</b> Normální provoz.....	42
<b>Obr. 5.23</b> Zastínění celého článků na 1 a 2 stringerech.....	42
<b>Obr. 5.24</b> Pozice zastíněného článku.....	42
<b>Obr. 5.25</b> Normální provoz.....	43
<b>Obr. 5.26</b> Zastínění celého článků na 1, 2,3 stringerech.....	43
<b>Obr. 5.27</b> Pozice zastíněného článku.....	43



## **8 Seznam tabulek**

<b>Tab 3.1</b> Parametry nejběžnějších Schottky diod s nízkým výkonem [5].....	20
<b>Tab. 4.1</b> Druhy poruch slunečního panele [13].....	26