

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody identifikace vad FV panelů

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou fotovoltaických článků a panelů. Úvod je zaměřený na základní popis fotovoltaických článků, jejich vlastností, základních parametrů a také se zabývá procesem přeměny světelné energie na energii elektrickou. V další části je popsán výrobní postup čistého křemíku používaného ve fotovoltaických aplikacích, dále se tato část zabývá popisem technologického postupu výroby používaných fotovoltaických článků a panelů včetně vysvětlení jejich vlastností. Ve třetí části jsou představeny různé defekty fotovoltaických panelů a jejich rozdělení. Tato část je zaměřena na popis možných metod identifikace těchto vad.

Klíčová slova

Fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, fotoelektrický jev, fotoemise, fotovoltaický jev, fotovodivost, Tracker

Abstract

The present thesis deals with the problematics photovoltaic cells and panels. Introduction is focused on basic description of photovoltaic cells, their properties, basic parameters and also deals with the process of converting light energy into electrical energy. The next section describes the production process of pure silicon, which is used in photovoltaic applications, in this part is further described the technological process used in manufacture of photovoltaic cells and panels, including an explanation of their properties. In the third part are presented various defects of photovoltaic panels and their distribution. This section focuses on the description of the possible methods of identifying these defects.

Key words

Photovoltaic cell, photovoltaic panel, photoelectric effect, photoemission, photovoltaic effect, photoconductivity, Tracker

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 7.6.2013

Tomáš Klečka

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1	Úvod	8
2	Základní vlastnosti FV článků	9
2.1	Fotoelektrický jev	9
2.2	Struktura fotovoltaického článku	15
2.3	Fotovoltaické ztráty.....	16
2.4	Elektrické parametry FV článků	19
3	Technologie výroby používaných článků a panelů	23
3.1	Materiály pro výrobu FV článků a panelů.....	23
3.2	Technologie výroby a rozdělení FV článků.....	26
3.3	Konstrukce a výroba FV článků a panelů.....	30
3.3.1	Postup výroby fotovoltaických článků	31
3.3.2	Postup výroby fotovoltaických panelů	31
4	Metody identifikace různých vad FV panelů	34
4.1	Zkoušení fotovoltaických panelů.....	34
4.2	Defekty fotovoltaických panelů	34
4.3	Rozdělení defektů fotovoltaických panelů.....	35
4.3.1	Materiálové defekty (Grow defects).....	36
4.3.2	Procesní defekty (Processing induced defects)	37
4.4	Metody identifikace vad FV panelů	39
4.4.1	Metody měření elektrických parametrů.....	40
4.4.2	Metody optické diagnostiky	40
5	Závěr	46
6	Seznam literatury a informačních zdrojů	49

1 Úvod

V současné době je možné dobře pozorovat velký rozmach fotovoltaiky. Čím dál častěji se objevují fotovoltaické panely na střechách průmyslových budov, firem, ale i na střechách rodinných domů. Na velkých územích jsou stavěny celé fotovoltaické elektrárny. Ty jsou konstruovány z celých modulů, které jsou dále složeny z FV panelů a ty z nejmenších částí, z fotovoltaických článků.

Tento způsob výroby elektrické energie má velkou výhodu v tom, že pro svoji činnost nepotřebuje žádné palivo, ale pouze sluneční záření. Je to tedy plně obnovitelný zdroj energie, kterým je možno vyrobit spoustu ekologické energie.

Cílem této práce je popis základních vlastností fotovoltaických článků včetně popisu fotovoltaické přeměny světelné energie na energii elektrickou. Dále se zabývá technologií výroby používaných fotovoltaických článků a panelů a též identifikace možných vad FV panelů.

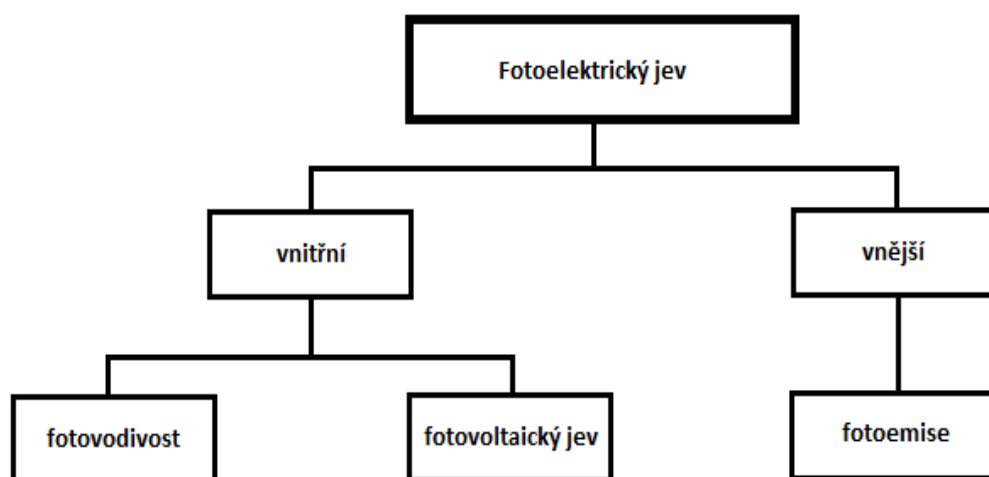
Úvodní kapitoly popisují vznik a princip fotovoltaického jevu, vlastnosti fotovoltaických článků a jejich parametry. Následuje vysvětlení technologie výroby používaných FV článků a panelů. Poslední kapitola se zabývá různými metodami identifikace defektů FV článků a panelů, které vznikají buďto již při výrobě, anebo při špatné manipulaci či instalaci. Závěrem jsou popsány základní metody používané pro identifikaci defektů fotovoltaických panelů.

2 Základní vlastnosti FV článků

2.1 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev je jevem, při kterém se dokáže přeměnit dopadající světelné záření na elektrickou energii. Tento jev se nejvíce začal využívat zhruba v polovině dvacátého století, kdy se hledaly nové zdroje energie pro kosmický výzkum a také pro průmyslovou výrobu. Pro kosmický výzkum je tento jev zcela nepostradatelný.

Nejvíce se fotoelektrického jevu využívá pro činnost fotovoltaických článků, které se poprvé objevily na Americké družici Avantgard v roce 1958. Poté toho využil i Sovětský svaz se svou družicí Sputnik 3. Dnes jsou fotovoltaické články mnohonásobně rozšířenější a používají se v mnoha rozmanitých aplikacích, kde je výhodné vyrobít elektrickou energii ze sluneční. Tento jev lze nyní vysvětlit zcela lehce. Avšak počátky objevení a zkoumání tohoto jevu se datují již od roku 1839, kdy se francouzskému fyzikovi Alexandru Edmondovi Becquerelovi podařilo zjistit, že osvětlením dvou kovových elektrod umístěných ve vodivém roztoku (elektrolytu) se na nich lehce zvýší napětí. Teoreticky vyložit tento jev však dokázal až v roce 1905 Albert Einstein, za což mu byla v roce 1922 udělena Nobelova cena za fyziku. Tento výklad nebyl však úplný. Zatím se totiž jednalo o fotoelektrický jev vnější, také nazývaný fotoemise. V dnešní době rozlišujeme fotoelektrický jev vnější a vnitřní, z čehož vnitřní dělíme ještě na fotovodivost a fotovoltaický jev.



Obr. 1.1 Rozdělení fotoelektrického jevu

Fotoelektrický jev vnější - fotoemise

Tento jev je založen na pohlcování světla neboli elektromagnetického záření povrchem látky, která je tomuto záření vystavena. Absorpce světla způsobí emisi valenčních elektronů, která probíhá ihned po ozáření materiálu. Toto záření je tvořeno fotony a vychází z představy, že každá elektromagnetická vlna o své frekvenci a vlnové délce vykazuje vlastnosti jako soubor částic, z nichž každá má svou energii a hybnost. U tohoto jevu nezáleží na intenzitě dopadajícího záření (energie dopadající za jednotku času na jednotku plochy). Ta určuje pouze množství uvolněných elektronů. Energie těchto elektronů závisí na frekvenci dopadajícího záření resp. na jeho vlnové délce λ . Bylo zjištěno, že pro každý materiál existuje různá frekvence resp. vlnová délka, která je nazývána mezní a značí se f_0 resp. λ_0 . Od této a vyšší frekvence a vlnových délek menších než mezní vlnová délka λ_0 má záření již takovou energii, aby dokázalo odtrhnout valenční elektron z krystalické mřížky materiálu. Zde existuje veličina nazývaná jako výstupní práce látky E_a . Je to nejmenší hodnota energie, kterou je potřeba dodat, aby byl elektron excitován z povrchu materiálu. Je závislá na mezní vlnové délce λ_0 . K fotoemisi nedojde, pokud bude vlnová délka větší než mezní. Při splnění této podmínky ($\lambda_{\text{zář}} \leq \lambda_0$) bude velikost proudu v obvodu přímo úměrná intenzitě dopadajícího záření.

Rovnice 1.1 popisuje energii, kterou obsahuje jeden foton (kvantum záření).

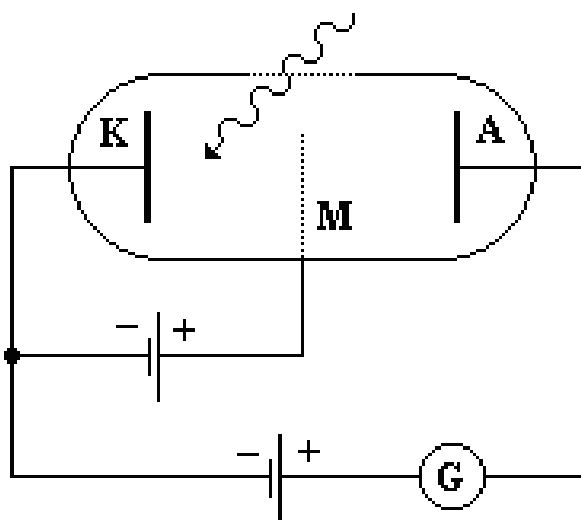
$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad [\text{J}] \quad (1.1)$$

kde E – energie [J]
 h - Planckova konstanta ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s)
 f – frekvence [Hz]
 c – rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s)
 λ – vlnová délka [m]

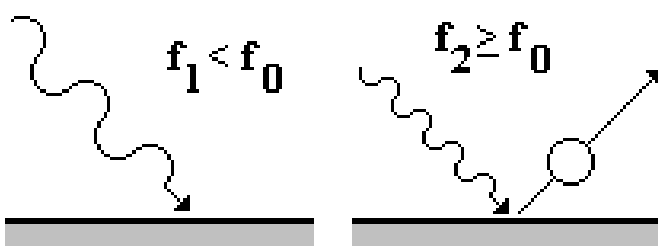
Každý foton (kvantum záření) je schopno excitovat pouze jeden elektron!

Vnější fotoefekt by se dal popsat takto:

Záření dopadá na katodu, ze které se začnou uvolňovat elektrony. Ty pak směřují k anodě a vzniklý proud v obvodu se dá změřit galvanometrem G. Ještě je možné na mřížku označenou jako M přivést napětí o záporné polaritě, které je schopno zbrzdit vylétávající elektrony a propouštět jen elektrony o určité energii.



Obr. 1.2 Fotoemise, převzato z [1]



Obr. 1.3 Vliv frekvence na uvolnění elektronu, převzato z [1]

Materiály, které potřebují nejmenší hodnotu energie potřebnou k excitaci jednoho elektronu z povrchu látky, a tudíž mají i nejmenší výstupní práci E_a jsou např. Cesium, Lithium, Draslík a Sodík. Tato hodnota je zhruba rovna 2eV. Ostatní materiály mají hodnotu výstupní práce násobně větší, ale nedokáží využívat ke svému fotoefektu oblast viditelného spektra světla, jelikož se mezní vlnová délka λ_0 pohybuje v oblasti UV záření. Fotoemise

jako taková je k technické výrobě proudu nevhodná, jelikož se vyznačuje jen malou účinností přeměny zářivé energie na energii elektronů. Tato hodnota dosahuje pouze setin procenta. Z fyzikálního hlediska je však tento poznatek důležitý.

Fotoelektrický jev vnitřní – fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev je opět založen na schopnosti materiálu pohltnout foton a jeho energii využít na uvolnění jednoho elektronu z krystalové struktury nějakého materiálu. Zde podstatně záleží na velikosti této energie, tedy na velikosti energie dopadajícího fotonu.

Jako hlavní surovina pro výrobu FV článků se tedy v drtivé většině používá křemík pro své dobré vlastnosti. Jedna z těchto vlastností je relativně malá šířka zakázaného pásu (1,12eV). A zde se dostávám k tomu, proč je zde tak důležitá velikost energie dopadajícího fotonu.

Jestliže bude mít foton energetickou hodnotu menší než 1,12 eV, křemíkem projde a nebude absorbován. Při hodnotě přesně 1,12 eV je křemíkem absorbován a vygeneruje jeden volný elektron, po kterém zbyde jedna kladná díra. Za předpokladu, že bude mít hodnotu větší než 1,12 eV, vygeneruje také jeden elektron a tím pádem jednu kladnou díru. Zbylá energie se přemění na teplo. Ohřátí článku však představuje ztráty, které snižují účinnost přeměny zářivé energie na elektrickou.

Z již známého vztahu pro velikost energie fotonu odvodím velikost mezní vlnové délky λ_0 , pro velikost energie fotonu: $E = 1,2\text{eV}$, za předpokladu: $1\text{eV} = 1,60217646 \cdot 10^{-19}\text{J}$

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{---->} \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{E}{h \cdot c} \quad \text{---->} \quad \lambda = 1033\text{nm} \quad (1.2)$$

kde E – energie [J]

h - Planckova konstanta ($6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s)

f – frekvence [Hz]

c – rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s)

λ – vlnová délka [m]

Dopadající foton o mezní vlnové délce $\lambda_0=1033$ (oblast infračerveného spektra) vygeneruje přesně jeden elektron a jednu kladnou díru.

Z pohledu fotovoltaického článku je tedy důležitá jen zářivá energie obsahující fotony, které je křemíková polovodičová struktura schopna pohltit.

Fotovoltaický článek je prakticky velká plošná polovodičová dioda, na jejíž přechod PN může dopadat světlo. [2] U FV jevu se využívá toho, že různé polovodiče jde dotovat určitými cizími atomy nějaké příměsi. Takové polovodiče se nazývají příměsové. Polovodiče se dotují pro změnu jejich určitých vlastností např. vodivosti. K dotování křemíku se používají většinou trojmocné či pětímocné prvky. Dotování polovodičů se také používá ke zvýšení počtu jejich volných nosičů náboje. Čistý křemík má přesně čtyři valenční elektrony. Když ho tedy budeme dotovat pětímocným prvkem, čtyřmocný jím bude nahrazen. Pro uskutečnění vazby v mřížce jsou však zapotřebí pouze čtyři valenční elektrony. Pátý elektron bude obíhat kolem atomu příměsi, ke kterému bude vázán pouze slabou silou. Jen malá energie tedy stačí k tomu, aby byl elektron odtržen a přešel do vodivostního pásu. Tím se z něj stane volný záporný nosič energie. Křemík s příměsí atomů některého pětímocného prvku dodává volné nosiče záporného náboje do vodivostního pásu.

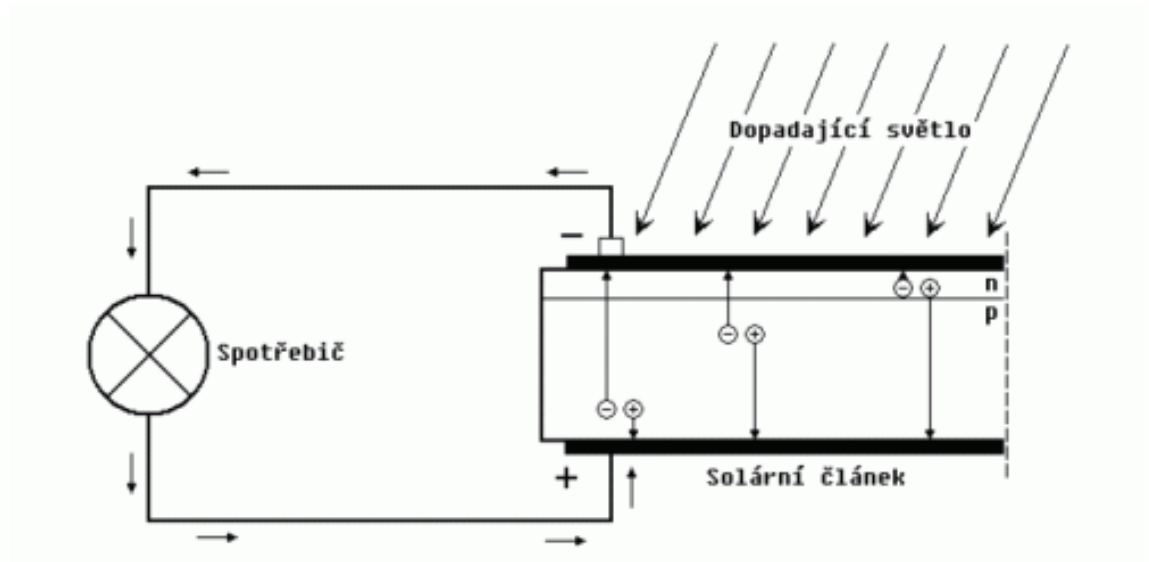
Běžně používané pětímocné prvky jako příměsi do polovodičů jsou As, P nebo Sb. Tyto příměsi nazýváme donory.

Křemík však může být dotován i atomy některých trojmocných prvků (takovéto příměsi nazýváme akceptory). V takovém případě se na vazbě podílí pouze tři elektrony a jeden schází. Takovýto elektron může být dodán i ze sousední vazby v mřížce v důsledku tepelné energie. Když se na toto místo dodá elektron z valenčního pásu, vytvoří se kladně nabitá díra, která se může volně přemisťovat materiálem. Materiál se tímto stane vodivým.

Polovodiče s tzv. děrovou (kladnou) vodivostí se označují jako polovodiče typu P (positive) a naopak polovodiče s elektronovou (zápornou) vodivostí jako typ N (negative). Mezi těmito dvěma typy polovodičů se na jejich styčné ploše nachází hraniční vrstva s důležitými vlastnostmi. Této vrstvě říkáme P-N přechod.

Ve vrstvě typu N je přebytek záporných nosičů náboje – elektronů, zatímco ve vrstvě typu P je elektronů nedostatek, který se projevuje jako kladné nosiče náboje - díry. Vrstva P-N přechodu zde funguje jako bariéra, která nedovolí elektronům volně přecházet mezi jednotlivými vrstvami. Elektrony mohou volně přecházet z vrstvy typu P do vrstvy typu N, ale naopak ne. Dopadají-li na povrch článku fotony (světlo), elektrony uvolněné ve vrstvě N zde setrvávají a hromadí se. Minoritní nosiče náboje vrstvy P (elektrony) mohou volně přecházet do vrstvy N, kde jsou majoritními nosiči náboje. Ve vrstvě N se tedy hromadí elektrony nesoucí náboj. Tím vznikne mezi horní a spodní vrstvou elektrické napětí.

Vytvořením kontaktů na obou vrstvách článku a jejich připojením k nějakému spotřebiči uzavřeme elektrický obvod, ve kterém začne procházet proud a nahromaděné elektrony přechází z horní vrstvy přes spotřebič na vrstvu spodní.



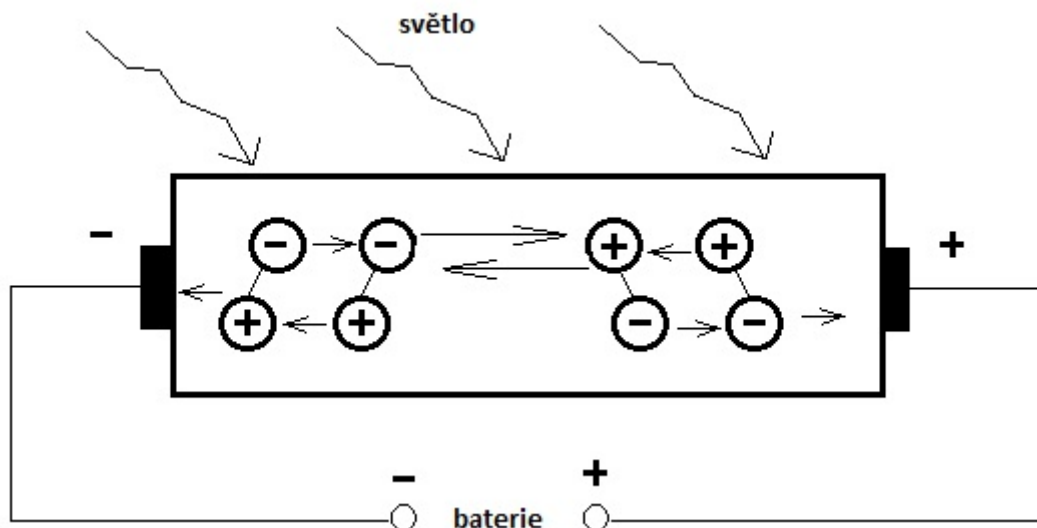
Obr. 1.4 Fotovoltaický jev, převzato z [18]

Fotoelektrický jev vnitřní – fotovodivost

Tento jev se také vyznačuje vlastností materiálu absorbovat kvantum záření (foton). Absorpcí tohoto kvanta záření se může vybudit některý elektron, který je vázán v této látce, na vyšší energetickou hladinu a tak se stát volným nosičem náboje.

Články vhodné k využívání tohoto jevu jsou z většiny vyrobené z křemíku. Čistý křemík neobsahuje téměř žádné příměsi. V dnešní době se dá vyrobit křemík s čistotou až 99,98%. Při nižších teplotách má poměrně velký odpor a tak je to vlastně dobrý izolant. Zvýší-li se teplota, zvýší se i rychlost kmitů atomů v krystalu a na základě toho se začnou uvolňovat volné záporné nosiče náboje (elektrony). Na místě každého takto uvolněného elektronu vznikne kladná díra. I tyto kladné nosiče náboje se mohou volně pohybovat krystalem látky. Toto vede ke snížení odporu resp. ke zvýšení vodivosti materiálu. Při vyšších teplotách tedy čistý křemík získává vodivost. Když je tato vodivost způsobena pouze vlastními volnými nosiči náboje (žádné nosiče náboje od příměsí), nazýváme ji vodivostí vlastní.

Fotovodivost je však jev, u kterého nenastává přímá přeměna světelné energie na energii elektrickou. Dopadající světelná energie na polovodič vybudí elektrony na vyšší energetické hladiny. Aby nastal jejich usměrněný pohyb materiálem, je nutné použít vnější zdroj energie např. baterii. Připojením takového vnějšího zdroje energie začne téct obvodem proud, jehož vznik je podporován dopadajícím zářením.

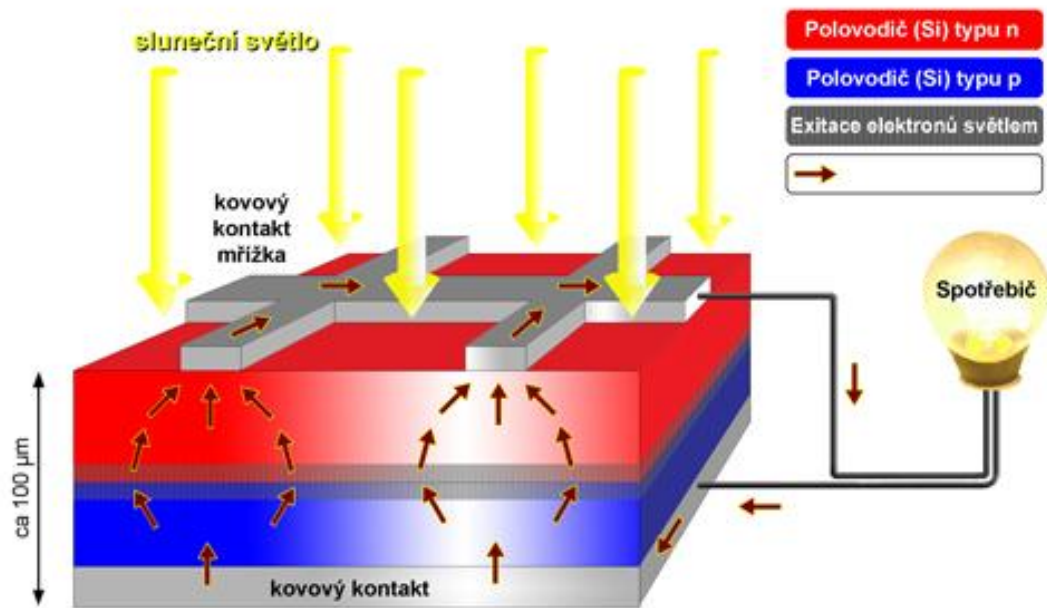


Obr. 1.5 Fotovodivost

2.2 Struktura fotovoltaického článku

Jak takový fotovoltaický článek vlastně vypadá? Jak již bylo zmíněno, sestává se z dvou polovodičových materiálů, z nichž má každý jiný typ vodivosti. Ve skutečnosti se skládá z více vrstev. Spodní vrstva článku je vlastně vodivý kontakt, který je umístěn na dolní vrstvě křemíkové destičky. Nad tímto kontaktem je nanášena tenká, řádově desítky μm tlustá vrstva silně dotovaného polovodiče typu P, kterou značíme jako P^+ . Nad ní je ještě jedna vrstva polovodiče typu P, ve které je již jen malý obsah příměsí. Tato vrstva má tloušťku již řádově stovky μm . Pak následuje P-N přechod a málo dotovaná vrstva polovodiče typu N s tloušťkou zhruba do $1\mu\text{m}$. Nad touto vrstvou již následuje poslední část článku – horní vodivý kontakt, který je nanášen nejčastěji ve formě stříbrné vodivé pasty. Spodní a horní vodivý kontakt mají za úkol odvádět proud z článku.

Princip činnosti fotovoltaického článku



Obr. 1.6 Řez fotovoltaickým článkem a princip jeho činnosti, převzato z [3]

2.3 Fotovoltaické ztráty

V technické praxi je vždy kladen důraz na minimalizaci jakýchkoliv ztrát zařízení a zároveň se vynalézá způsob jak dané zařízení zhotovit co nejlevněji. Ani u fotovoltaického článku to není výjimkou.

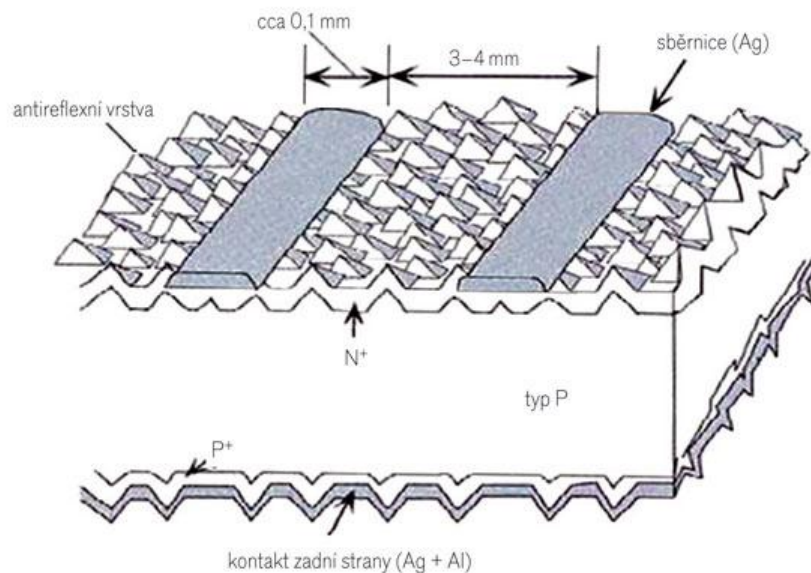
U fotovoltaických panelů dochází k různým ztrátám (odrazem, rekombinací, v důsledku poruch atp.).

Ztráty odrazem

Ztráty odrazem jsou způsobeny částečným odražením světla od povrchu článku, které se tím pádem nedokáže absorbovat. Ideálně je požadován nulový odraz, aby se pohltilo takové množství světla, jako kdyby se nic neodrazilo. Odrazivost světla u křemíkových článků činí zhruba 30%.

Snižování ztrát odrazem

Odrazivost se dá snižovat různými postupy. Jedním z nich je např. použití antireflexní vrstvy (SiN_x nebo TiO_2) [4], díky které se sníží odrazivost světla zhruba o dvě třetiny. Dalším postupem je tzv. texturace povrchu. Tento způsob snížení odrazivosti materiálu spočívá ve vytvoření malých jehlanů na povrchu článku. Tyto jehlany způsobí, že světlo dopadající na jejich povrch se odrazí i dolů. Tím se docílí toho, že dovnitř článku pronikne více světla. Navíc fotony, které projdou do článku a odrazí se od zadní elektrody (tím pádem nedojde k fotovoltaické přeměně), jsou totálním odrazem vráceny zpět. Tím se zvyšuje i účinnost článku. Vytvoření těchto jehlanů se provádí různými leptadly. Texturace povrchu je tedy důležitý postup zvyšování účinnosti sériově vyráběných FV článků. Účinnost článku s texturací povrchu se pohybuje kolem 20%.



Obr. 1.7 Texturace povrchu, převzato z [4]

Další možnosti snížení ztrát

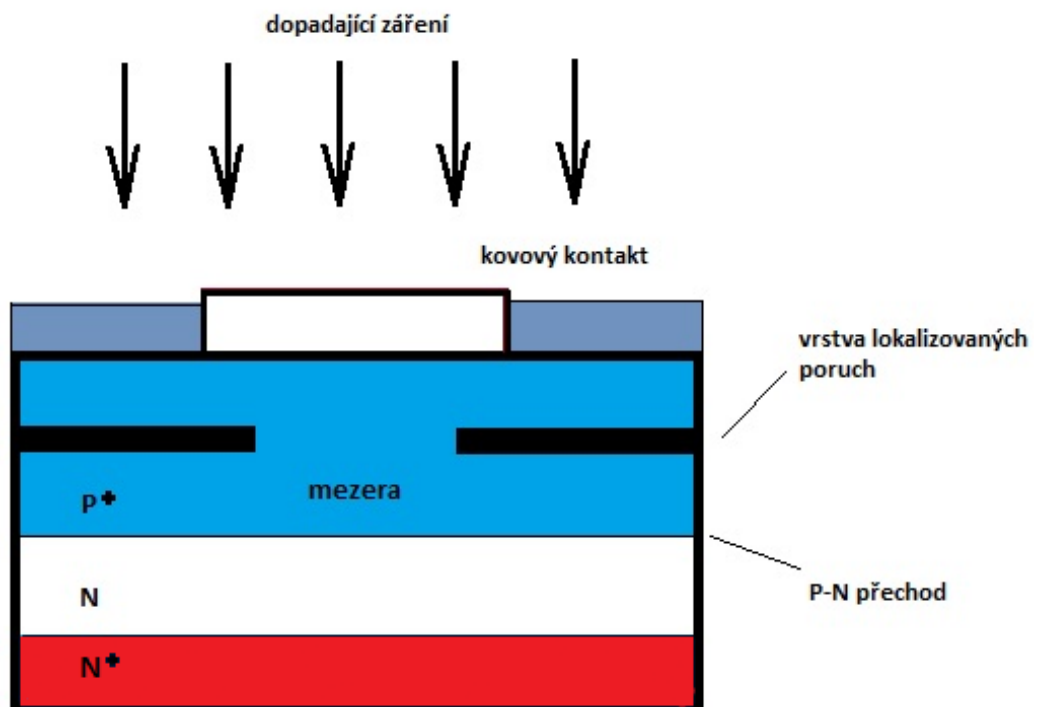
V případě, že funguje horní osvětlovaná část fotovoltaického článku zároveň i jako kontakt a odvádí proud z článku, je vyžadováno, aby kladla co nejmenší odpor. Obecně se snažíme o to, abychom odvedli získanou energii s co nejmenšími ztrátami. Vyrobený

elektrický náboj se odvádí nejčastěji pomocí kovové mřížky nebo pomocí vodivé průhledné elektrody.

Existují ještě další metody snižování ztrát a to např. metody nazvané PESC a PERC. Obě tyto metody se snaží co nejvíce zefektivnit přenos energie z křemíku do vodivých kontaktů.

Metoda PESC využívá technologii laserového žlábkování a uložených kontaktů. Čím větší plochu kontakt zabírá, tím více elektronů je schopný pojmout. Zároveň však stíní vrstvě křemíku a tím brání přístupu světla. Je tedy důležité vzájemné uspořádání kontaktů a křemíku.

Metoda PERC je založená na trochu jiném principu. U křemíkových článků se zde na P-N přechodu mezi dotovanými vrstvami vytvoří defektní vrstva, která není po celé délce P-N přechodu, ale má v sobě mezeru. Nosiče náboje tedy zcela jistě poputují touto mezerou, protože zde bude menší odpor. Tímto způsobem nosiče náboje nasměrujeme přímo ke kontaktu a tím pádem snížíme riziko rekombinace. Tato metoda zvyšuje účinnost přeměny světla na elektrickou energii o několik procent.

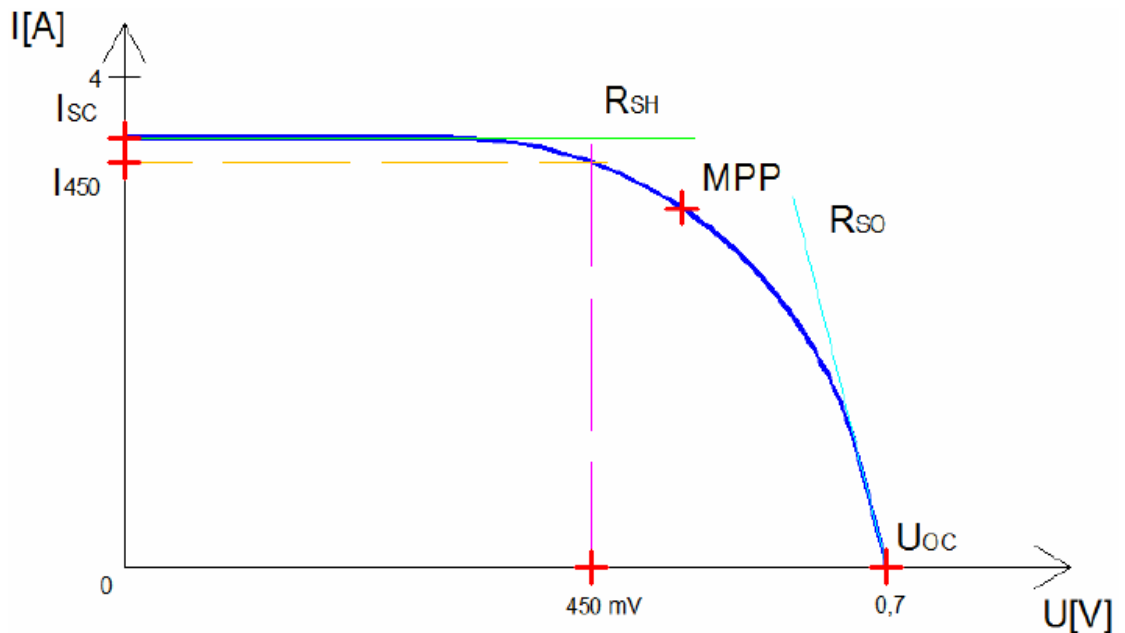


Obr. 1.8 Metoda PERC

2.4 Elektrické parametry FV článků

V-A charakteristika

Jedním z prostředků pro popis a určování parametrů u různých součástek a zařízeních je V-A charakteristika. Ani FV články toho nejsou výjimkou. Udávaná charakteristika popisuje závislost proudu na napětí a obsahuje několik důležitých bodů, pomocí kterých se posuzuje kvalita měřeného článku. Každý fotovoltaický článek vlastní svoji dokumentaci, ve které je k nalezení většina výrobcem udaných parametrů. Některé další parametry je potřeba odečíst z V-A charakteristiky nebo je doměřit.



Obr. 1.9 Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku, převzato z [13]

Maximální výkon (MPP)

Tento parametr je reprezentován bodem, který nalezneme na V-A charakteristice. Udává nám maximální výkon článku a je určen napěťovou a proudovou souřadnicí. Napěťová a proudová souřadnice je dána velikostí napětí U_m a proudu I_m , při kterém článek dodává maximální výkon.

U_m – napětí, při kterém článek dodává maximální výkon

I_m - proud, při kterém článek dodává maximální výkon

Vnitřní odpor – R_m

Velikost vnitřního odporu fotovoltaického článku můžeme vypočítat ze znalosti veličin U_m a I_m . Je definován jako velikost odporu článku při maximálním výkonu.

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

Proud nakrátko – I_{SC}

Proud nakrátko je další veličinou, kterou můžeme vyčíst z V-A charakteristiky. Určuje se při $U = 0V$.

Za předpokladu nulového sériového odporu ($R_{SO} = 0$) je proud generovaný článkem roven právě proudu I_{SC} . Je to maximální hodnota elektrického proudu, který je článek schopen dodávat při denním osvětlení. Tato hodnota závisí na ploše článku, teplotě a intenzitě denního osvětlení. Průměrné hodnoty proudu I_{SC} se pohybují v rozmezí mA až jednotek A. Záleží na velikosti plochy panelu.

Napětí naprázdno - U_{OC}

Tato hodnota se určuje při $I = 0A$, ve stavu, kdy není fotovoltaický článek připojen k zátěži. Je to tedy maximální hodnota elektrického napětí, která se objeví na svorkách článku při dané teplotě a intenzitě osvětlení.

Proud I_{450}

Je to velikost proudu protékající článkem při napětí 450mV. Je to hodnota důležitá pro kategorizaci fotovoltaických článků do různých výkonových skupin.

Činitel plnění (fill factor)

Tento parametr je dán poměrem dvou výkonů, a to výkonu maximálního a výkonu získaného z proudu nakrátko I_{SC} a napětí naprázdno U_{OC} . Ideálně by se jeho hodnota měla rovnat jedné. Čím je vyšší, tím je článek schopen dodávat větší výkon do zátěže. Tento

parametr je závislý na kvalitě kontaktů, kvalitě zpracování materiálu článku a na odporu aktivní polovodivé vrstvy. Vypovídá o kvalitě měřeného článku.

Činitel plnění se vypočte jako:

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde P_m – nejvyšší výkon, který je článek schopen dodávat

Účinnost

Tento údaj vypovídá o dokonalosti přeměny světelné energie ve formě slunečního záření na energii elektrickou. U sériově vyráběných fotovoltaických článků se tato hodnota pohybuje v rozmezí kolem 13-18%. Se stoupající teplotou účinnost klesá. Velikost účinnosti však také výrazně ovlivňují i vlastnosti materiálu, ze kterého je článek vyroben.

Účinnost je dána vztahem:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{U_m \cdot I_m}{E \cdot A_c} \quad [\%] \quad (2.3)$$

kde P_{rad} – výkon dopadajícího záření
 E – intenzita osvětlení [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
 A_c – plocha fotovoltaického panelu [m^2]

Sériový a paralelní odpor – R_{SH} , R_{SO}

Velikost těchto dvou parametrů fotovoltaického článku nám dává informaci o jeho kvalitě. Velikost sériového odporu článku R_{SO} by se měla ideálně rovnat nule. V praxi tomu tak ale není. Čím vyšší tento odpor bude, tím na něm vznikne větší úbytek svorkového napětí. Jeho velikost je dána součtem odporů kontaktů, přechodů a materiálu.

Naopak moc malá hodnota paralelního odporu článku R_{SH} indikuje vadný článek, protože se chová, jako by byl zevnitř zkratován. Ideálně by se pak jeho hodnota měla rovnat nekonečnu.

Hodnoty těchto odporů jsou dány sklonem tečen vytvořených ve V-A charakteristice v bodech I_{SC} a U_{OC} . Paralelní odpor R_{SH} je dán sklonem tečny vytvořené v bodě I_{SC} , hodnota sériového odporu R_{SO} je pak sklonem tečny vytvořené v bodě U_{OC} .

3 Technologie výroby používaných článků a panelů

3.1 Materiály pro výrobu FV článků a panelů

Křemík

Jak bylo již zmíněno, nejvíce rozšířeným materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík. Nejvíce se používá kvůli několika přednostem. Je to druhý nejrozšířenější prvek na Zemi, tudíž je dost dobře dostupný. Disponuje také dobrými mechanickými vlastnostmi včetně dobré odolnosti a je chemicky stálý. Je celkem levný, není jedovatý a je dobře známý pro svoje využívání v elektrotechnice jako polovodičového materiálu. Velikost zakázaného pásu křemíku byla již zmíněna v kapitole 1.1 ($\Delta E_g = 1,12\text{eV}$), tato hodnota je rovněž vyhovující pro využití křemíku pro tyto aplikace.

Pro aplikace křemíku ve fotovoltaických systémech je vyžadována jeho vysoká čistota. V přírodě se vyskytující křemík (nejčastěji ve formě křemene – oxid křemičitý SiO_2) má relativně malou čistotu, která nevyhovuje pro fotovoltaické aplikace. Surový křemík se většinou vyrábí redukcí uhlíkem z písku v obloukové peci.

Zjednodušenou reakci můžeme zapsat chemickou rovnicí:



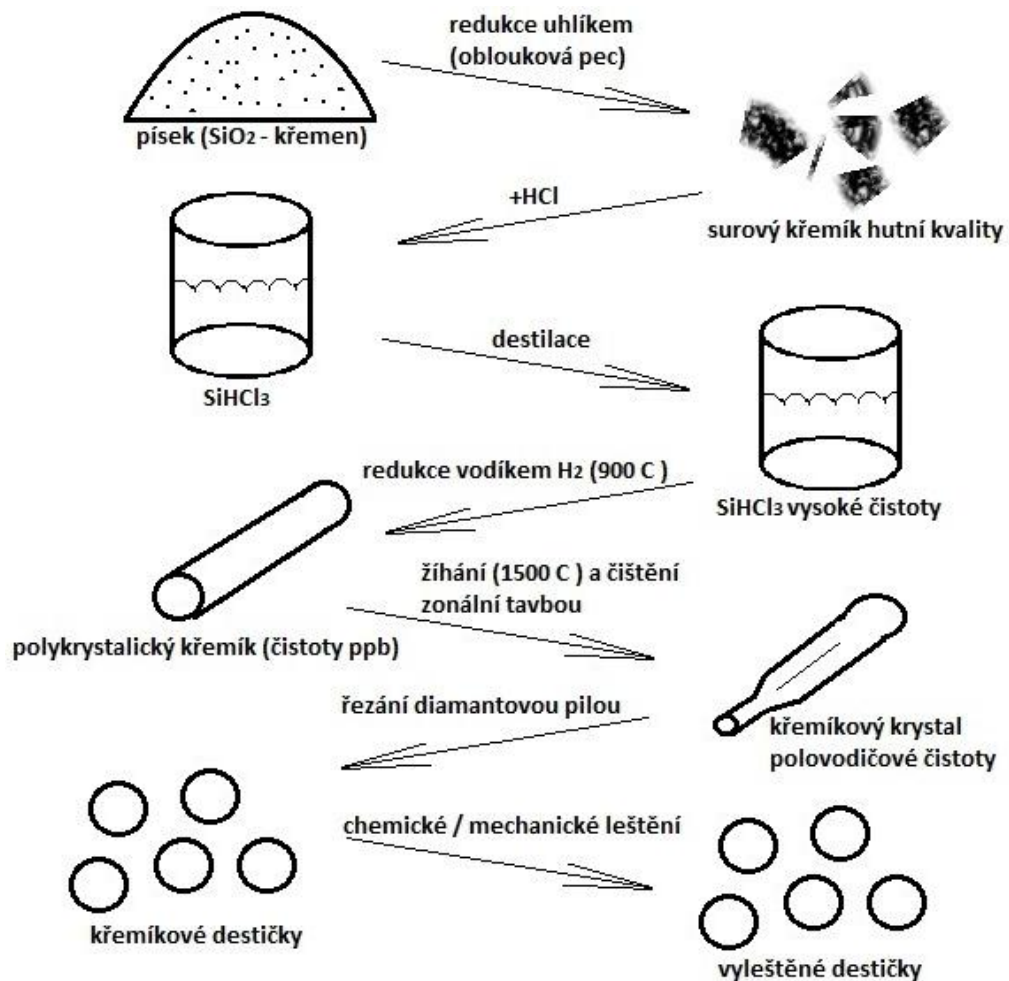
Do obloukové pece se kontinuálně dopravuje písek, který je hlavní surovinou pro výrobu křemíku a spolu s ním se ještě přidává uhelný koks. Nejvyšších teplot dosahuje pec v dolní části, kde se teplota pohybuje zhruba kolem $T \approx 2000^\circ\text{C}$. Roztavený křemík se z pece kontinuálně odlévá. Křemík takto vyrobený nedosahuje takové čistoty, jaká je potřeba pro výrobu fotovoltaických panelů.

Čistota materiálu se testuje měřením rezistivity. Menší rezistivita materiálu znamená vyšší množství příměsí, což je špatné a nevyužitelné pro správnou funkci FV článků. Čistota křemíku potřebná pro správnou funkci FV článků se pohybuje zhruba na jednotkách ppm (10^{-6} příměsí).

Jedním ze způsobů dosažení dostačující čistoty křemíku je převod na kapalnou fázi a její následná destilace. Takový postup je znázorněn na obr 2.1.

Dalším z dnes hojně používaných postupů výroby čistého křemíku je technologie Simens s chlórovým cyklem. Tento postup je však nebezpečný pro obsluhu i pro životní prostředí a navíc je i velmi energeticky náročný.

Nové technologie výroby čistého křemíku, které budou méně náročné na spotřebu energie a šetrné k lidskému zdraví i životnímu prostředí, jsou zatím ve fázi výzkumu.



Obr. 2.1 Výroba čistého křemíku

Z vyčištěného křemíku jakožto polotovaru se vyrábí monokrystalické či polykrystalické ingoty.

Z takto vzniklých polykrystalických či monokrystalických ingotů je nutné vyrobit destičky. Ty se vyrábí příčným nařezáním ingotů diamantovými či drátovými řezačkami. Nařezané destičky z ingotů tvoří první základ fotovoltaického článku. Tloušťka destiček je závislá na použitém typu řezačky. V dnešní době je tato technologie celkem dobře zvládnuta. Tloušťka těchto destiček se tedy pohybuje kolem (150-300 μ m). Čím menší je tloušťka destiček, tím je větší úspora materiálu a energie.



Obr. 2.2 Křemíkové ingoty, převzato z [7]

Polykrystalické a monokrystalické články se tedy liší postupem výroby křemíkového ingotu.

Další materiály

Dnešní technologie výroby fotovoltaických panelů umožňují použití i jiných polovodičů než křemíku (nejčastěji GaAs či InP). Tyto polovodičové materiály se však nepoužívají v běžně používaných fotovoltaických aplikacích. Vzhledem ke své vyšší účinnosti, která se pohybuje kolem 25%, jsou velice vhodné pro použití v kosmických aplikacích. Cena těchto speciálních článků je mnohonásobně vyšší, avšak v tomto případě není limitujícím faktorem. Vyžaduje se zde maximální účinnost fotovoltaické přeměny energie a také pokud možno co nejvyšší odolnost článků proti škodlivému kosmickému záření.

Tenkvrstvé články mohou být i na bázi CuInSe, CdTe a nebo na bázi heteropřechodů mezi druhy různých polovodiivých materiálů. Výhodou je nízká cena těchto článků. Na druhou stranu mají malou účinnost (10%).

3.2 Technologie výroby a rozdělení FV článků

Polykrystalické a monokrystalické články se liší postupem výroby křemíkového ingotu. Z hlediska výroby a struktury jsou FV články rozděleny na několik typů (monokrystalické, polykrystalické, amorfnní, oboustranné, ...).

Vyrábí se buď technologií tenkých, nebo křemíkových krystalických vrstev. Obě mají své klady a zápory.

Technologie křemíkových krystalických vrstev

Je-li článek tvořen polovodičovou diodou s přechodem P-N, jedná se o technologii křemíkových krystalických vrstev. Články vyrobené touto technologií jsou zhruba 0,2-0,3 mm tlusté a materiál může být polykrystalický i monokrystalický křemík. Tato technologie je v současné době nejpoužívanější.

Na trhu je zhruba 85% článků vyrobených právě touto technologií. Nevýhodou je nutnost použití většího množství materiálu.

Polykrystalické fotovoltaické panely

Polykrystalické fotovoltaické panely se vyznačují většinou modrým odstínem, ostrými rohy a nerovnoměrností jejich plochy. Destičky se vyrábí z ingotů z polykrystalického křemíku. Jejich výroba je jednodušší. Výroba takového ingotu spočívá v nalití roztaveného materiálu do připravené formy, kde se nechá pomalu chladnout. Chladnutí musí být opravdu pomalé, aby byla vzniklá zrna co největší. Takováto zrna se mezi sebou liší velikostí a plochou. Čím větší budou, tím bude ve vzniklém materiálu méně dislokací a jiných poruch. Hranice mezi takto vzniklými zrny jsou bariéry pro průchod elektronů. Proto je nutné je minimalizovat.

Tento typ panelů se dá použít i v oblastech, kde může být určitá odchylka od ideální orientace panelu vůči zdroji záření (slunce). Polykrystalické články sice dosahují účinnosti pouze kolem 15%, ale jejich výhodou jsou nižší pořizovací náklady.



Obr. 2.3 Polykrystalický fotovoltaický panel, převzato z [9]

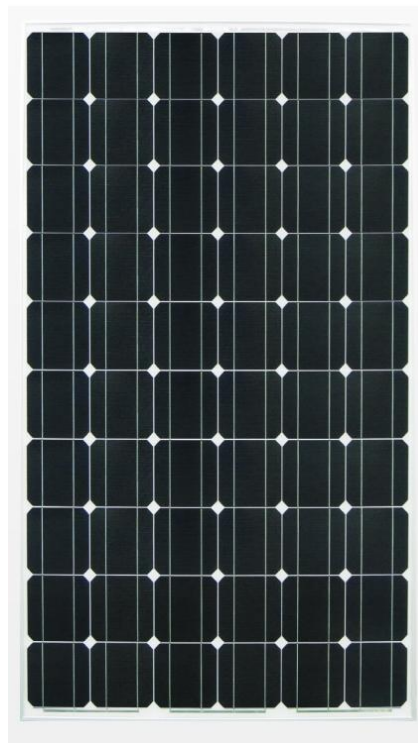
Monokrystalické fotovoltaické panely

Tento typ fotovoltaických panelů se vyznačuje většinou tmavým, hnědým až černým odstínem. Oproti polykrystalickým se vyznačují oblými rohy a rovnoměrnou plochou. Destičky se analogicky jako u polykrystalických článků vyrábí z ingotů, ale tentokrát z monokrystalického křemíku.

Pro výrobu ingotů se používá tzv. Czochralskiho metoda. Ta spočívá v ponoření malého monokrystalu jako zárodku do taveniny o teplotě zhruba 1415°C. Tento monokrystal se otáčí a přitom se velmi pomalu vytahuje z taveniny. Roztavený křemík se kontinuálně promíchává, až se jednotlivé krystaly uspořádají vzájemně stejně. Proces se provádí za

sníženého tlaku v inertní atmosféře. Pak už se z takového ingotu nařežou jednotlivé destičky.

Tento typ panelů je nejvíce vhodný pro oblasti, kde je zaručen ideální sklon a orientace panelu. Monokrystalické články představují cca přes 40% všech vyráběných FV článků. U sériové výroby se účinnost tohoto typu článků pohybuje kolem 20%. Existují také laboratorní vzorky, které jsou vybavené různými zdokonalujícími prvky. U těchto vzorků se již podařilo přesáhnout 30% hranici účinnosti.



Obr. 2.4 Monokrystalický fotovoltaický panel, převzato z [9]

Oboustranné FV panely

V dnešní době už není nijak výjimečné setkat se s oboustranným fotovoltaickým panelem. Tato konstrukce obsahuje stejnou strukturu jak na zadní tak i na přední straně. Takový oboustranný panel je schopen pohlcovat záření z obou stran. Tím pádem se jeho fotovoltaická účinnost zvyšuje, avšak na přední stranu článku dopadá větší množství světelného záření než na stranu zadní (např. odrazem od země).

Technologie tenkých vrstev

Technologie tenkých vrstev se vyznačuje tím, že fotovoltaický panel je tvořen nosnou plochou, na které jsou napařené velmi tenké vrstvy mikrokrytalického či amorfního (beztvarého) křemíku. Nosná plocha může být např. sklo, textilie, plast, papír atp. [6] Tloušťka takovýchto vrstev se pohybuje řádově v jednotkách mikrometrů.

Výhodou této technologie je menší spotřeba materiálu, proto jsou tyto panely levnější. Účinnost článků vyrobených technologií tenkých vrstev se pohybuje kolem 12-15%. Životnost je kratší oproti článkům vyrobeným technologií křemíkových krystalických vrstev. Tenkovrstvé fotovoltaické panely představují cca 17% veškeré výroby u nás. Uplatňují se v malých systémech využívajících fotovoltaickou přeměnu energie. Můžeme je najít např. i v malých kapesních kalkulačkách. Tenkovrstvé panely pracují dobře i při nízkých intenzitách osvětlení.

Amorfní fotovoltaické panely

Jedná se o zvláštní typy FV panelů, které se oproti krystalickým liší jak ve výrobě, tak ve vlastnostech.

Jak již název napovídá, tyto panely jsou vyrobeny z amorfního (beztvarého) křemíku. Amorfní látky mají ve své struktuře nahodilou orientaci atomů. Velikost zakázaného pásma amorfního křemíku je 1,7eV. Tato hodnota se tedy liší od velikosti zakázaného pásma krystalického křemíku, jehož velikost je 1,12eV. Toto ovlivňuje velikost vlnové délky absorbovaného záření, která je pro amorfní křemík rovna vlnové délce 730nm.

Díky větší velikosti zakázaného pásu má panel z amorfního křemíku výhodu. Jeho účinnost klesá se zvyšující se teplotou pomaleji než u panelů z krystalického křemíku. Další nespornou výhodou je, že tento typ dokáže absorbovat i záření rozptýlené v mracích (nepřímé sluneční záření), zatímco fotovoltaické články z krystalického křemíku pro svou funkci potřebují přímé sluneční záření. Další výhodou je hmotnost, která je celkově nižší než u panelů z krystalického křemíku. Navíc tyto panely neobsahují letované spoje, které mohou časem degradovat a tím ve finále snížit výkon. Články z amorfního křemíku se mezi sebou souvisle spojují již během výroby. Nevýhodou je však poněkud nižší účinnost (8-10%).

Výroba amorfních křemíkových článků se provádí nanášením tenké vrstvy amorfního materiálu do folie nebo skleněného obalu. Hotové panely se dají ohýbat a jsou poměrně tenké.



Obr. 2.5 Amorfní fotovoltaický panel, převzato z [17]

Koncentrátorové fotovoltaické panely

Koncentrátorové panely jsou zvláštním typem fotovoltaických panelů. Tato technologie FV panelů je dalším krokem jak zvýšit účinnost fotovoltaické přeměny energie. Používají se zde soustavy čoček, které soustřeďují světelné záření na povrch jednotlivých článků. Tím se docílí vyšší intenzity světla, které na jednotlivé články dopadá. Vyšší intenzita světla = více elektrické energie vzniklé fotovoltaickou přeměnou v článku. Koncentrátorové FV panely bývají často upevňovány do zařízení pro automatické sledování slunce (tzv. Tracker) a bývají chlazeny.

3.3 Konstrukce a výroba FV článků a panelů

Základ fotovoltaického článku je křemíková destička, vyrobená z vysoce čistého křemíku. Vznikne nařezáním z křemíkového ingotu. Výroba křemíkového ingotu je vysvětlena v kapitole 2.1.

3.3.1 Postup výroby fotovoltaických článků

Křemíkové destičky nařezané z ingotů jsou nejprve leptáním zbaveny nečistot. Na těchto destičkách ať polykrystalických či monokrystalických se pak vytvoří texturace (povrch článku se vyleptá). Článek tímto zmatní a na jeho povrchu se objeví malé jehlany, což způsobí zvýšení účinnosti. [19]

Fotovoltaický článek je velká plošná polovodičová dioda, což znamená, že obsahuje P-N přechod. Ten je orientovaný kolmo k čelní ploše článku. Jeho vznik se docílí difúzí příměsí v tzv. difúzní peci. Typickou běžně používanou příměsí je fosfor. V této fázi výroby je již fotovoltaický článek téměř schopný přeměny světelné energie na energii elektrickou. Tuto fotovoltaickým jevem vzniklou energii je však nutné z článku odvádět. Musíme tedy článek doplnit kontakty. Článek má kontakt na zadní i přední straně. Zadní kontakt se u většiny článků (kromě oboustranných) nanáší celoplošně. Kontakty se na články nanášejí různými technologiemi. Nejpoužívanější je technologie sítotisku nebo technologie vakuového napařování. U speciálních druhů článků (např. články s vysokou koncentrací záření) se kontakty panelu vnořují přímo do polovodičového materiálu. Zvýší se tím styčná plocha mezi kontaktem a polovodičem. Nanášejí se většinou v podobě stříbrné vodivé pasty. Přední kontakt má tvar mřížky či hřebínku a je požadováno, aby zakrýval co nejmenší plochu FV článku a tak co nejméně stínil dopadajícímu světelnému záření.

Vytvořením kontaktů ještě není FV článek kompletní. Musí se vytvořit vodivé propojení vytvořených kontaktů s křemíkovou strukturou. To se provádí vypalováním článku (tzv. sintrování). Nakonec následuje úprava povrchu antireflexní vrstvou. Tato vrstva má za úkol minimalizovat odraz světelného záření od povrchu tak, aby se maximum světla pohltilo do článku a dostalo se tak k P-N přechodu.

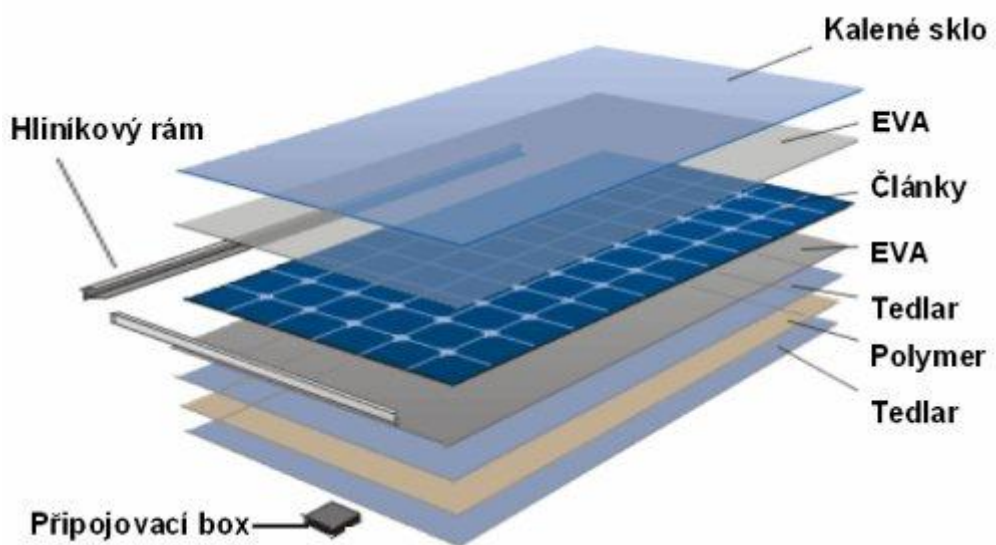
3.3.2 Postup výroby fotovoltaických panelů

Propojené, zapouzdřené a orámované větší množství fotovoltaických článků se nazývá fotovoltaický panel. Tyto články se ve FV panelech spojují sérioparalelně pro dosažení určité hodnoty stejnosměrného napětí a dodávaného výkonu při předepsané hodnotě osvětlení. Celkový výkon dodávaný fotovoltaickými panely je prakticky závislý hlavně na jejich celkové ploše.

Kompletace takovýchto panelů není nijak extra složitá, pouze se musí dodržovat určitý postup. Přední stranu fotovoltaického panelu tvoří transparentní temperované sklo. Naopak zadní stranu panelu tvoří laminátová kompozice složená z PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid - polyetyléntereftalát - polyvinylidenfluorid). Mezi přední a zadní stěnou panelu se již nachází samotné sérioparalelně propojené fotovoltaické články. Vrstva těchto článků je navíc z obou stran chráněna speciální polymerní látkou nazývanou jako EVA (etylen vinyl acetát). Tento polymer je odolný vůči korozi, je čirý a disponuje samozhášivými schopnostmi. Takto sestavený polotovár fotovoltaického panelu se nakonec vloží do zařízení, kde se zahřeje na teplotu vyšší, než je teplota tání EVA fólie. Roztavená fólie pak zalije fotovoltaické články v prostoru mezi předním tvrzeným sklem a zadní laminátovou konstrukcí.

Před vlastní montáží jsou FV panely usazeny do nerezových či hliníkových rámu. Temperované sklo tvořící přední stěnu panelu je vlastně tvrzené sklo, které chemicky pasivuje povrch FV panelu a je odolné proti povětrnostním vlivům i vlivům počasí (kroupy, déšť,...). Do rámu se panely lepí za pomoci silikonů. Tyto silikonové lepidla musí být odolné vůči degradujícím vlivům UV záření. Takto zkompletované panely se nakonec ještě opatřují krabicí s výstupními kontakty, které zajišťují jejich jednoduché propojení. Hotové fotovoltaické panely připravené k instalaci jsou tedy vodotěsné, prachuvzdorné a odolné proti nečistotám a nepříznivým vlivům okolí. Jejich životnost bývá 20-30 let.

Místo etylen vinyl acetátu se také mohou použít silikonové zalévací hmoty, které mají také dostatečně dobré vlastnosti pro krytí článků, jako jsou pružnost, široký rozsah provozních teplot, dobrý přenos tepla, snadné použití atp.



Obr. 2.6 Skladba fotovoltaického panelu, převzato z [16]

Fotovoltaické panely se mohou spojovat sériově či paralelně. Sériovým spojením se dosáhne vyšší hodnoty napětí, paralelním naopak vyšší hodnoty proudu. Dohromady jsou taková spojení fotovoltaických panelů nazývána fotovoltaickými moduly.

Při Konstruování fotovoltaických panelů by se měly používat fotovoltaické články od stejného výrobce, aby byly zaručeny jejich stejné parametry.

4 Metody identifikace různých vad FV panelů

4.1 Zkoušení fotovoltaických panelů

Životnost běžného fotovoltaického panelu je zhruba 20-30 let. Po instalaci je vystaven povětrnostním vlivům, kyselým dešťům, kroupám, námraze, tíze sněhu, škodlivému UV záření, střídání teplot a v neposlední řadě také různému mechanickému namáhání. Z důvodu bezpečnosti a zaručení udávané životnosti musí každý nový typ fotovoltaického panelu splnit určitá kritéria a požadavky, aby se podle zákona mohl vyrábět a dále distribuovat. Musí být tzv. certifikován. Postup certifikace je popsán mezinárodní normou IEC 61215 a provádějí ji pracoviště k tomu určená [21]. Certifikace produktu je poměrně nákladná záležitost a její výsledek je nejistý. Výrobce tedy musí vynaložit prostředky na certifikaci, aniž by si byl jistý, jestli jeho výrobek certifikát dostane či ne. Celý proces probíhá podle normou stanoveného harmonogramu, který trvá kolem 4 měsíců.

4.2 Defekty fotovoltaických panelů

Při výrobě, manipulaci, instalaci či převozu fotovoltaických panelů může dojít k poruše vnitřní struktury materiálu fotovoltaického článku. Tyto poruchy se projevují různými nežádoucími anomáliemi. Mohou také vzniknout během své dlouholeté činnosti v nepříznivých venkovních podmínkách.

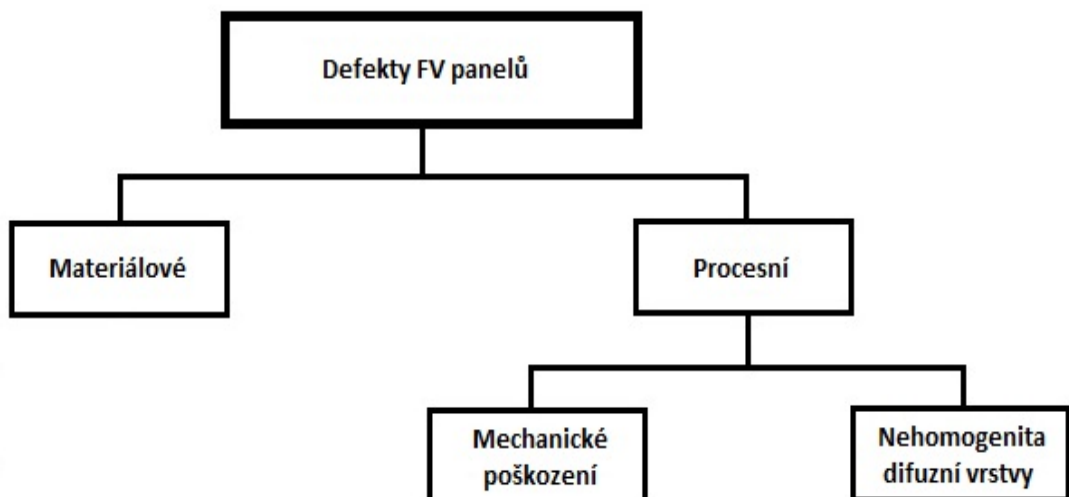
Porušený panel již nemá takové vlastnosti jako za standartních podmínek a toho se snažíme vyvarovat. Vadné panely často způsobují překvapivě nemalé poklesy výkonu celých segmentů fotovoltaických elektráren. Vlivem těchto vad, znečištěním nebo dlouhodobým zastíněním také může dojít k ohřívání celých panelů, což vede k jejich degradaci a snížení životnosti.

Takovéto defekty jsou nežádoucí a vždy je příhodné omezit je již ve fázi výrobního procesu.

4.3 Rozdělení defektů fotovoltaických panelů

Defekty narušují strukturu křemíkových fotovoltaických článků a panelů a zhoršují tím jejich elektrické vlastnosti. Dělí se na dvě skupiny podle jejich vzniku. První skupinou jsou defekty materiálové. Tento typ defektů FV panelů zahrnuje poruchy materiálu, které vznikají při výrobě křemíku, jako suroviny pro výrobu fotovoltaických článků. Druhou skupinou jsou vady vzniklé během procesu výroby již samotného fotovoltaického článku z křemíku a nazývají se procesní defekty, které ještě dále dělíme na mechanické poškození a na nehomogenitu difuzní vrstvy.

Defekty na fotovoltaických panelech tedy mohou vznikat již při výrobě a stejně tak mohou vznikat např. nevhodnou manipulací, instalací či působením všech nepříznivých vlivů v průběhu, kdy je zařízení v provozu.



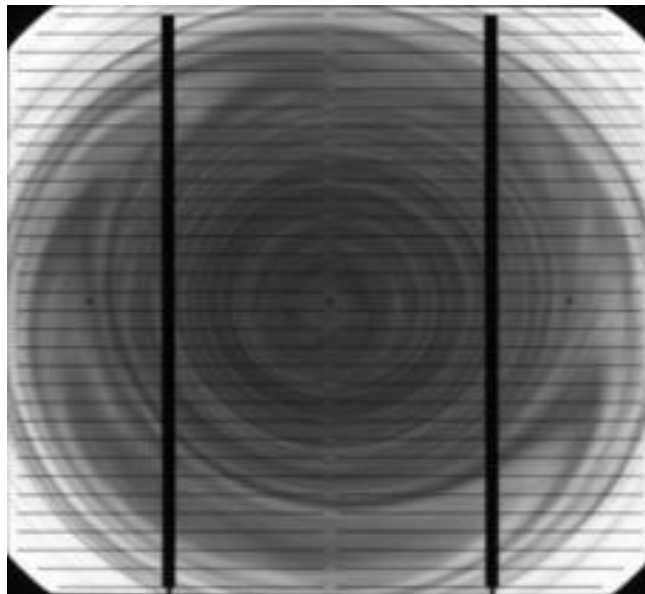
Obr. 3.1 Rozdělení defektů FV panelů

Existují různé metody identifikace těchto defektů, které nám umožňují objektivně posoudit kvalitu měřeného fotovoltaického panelu.

4.3.1 Materiálové defekty (Grow defects)

Vírový defekt

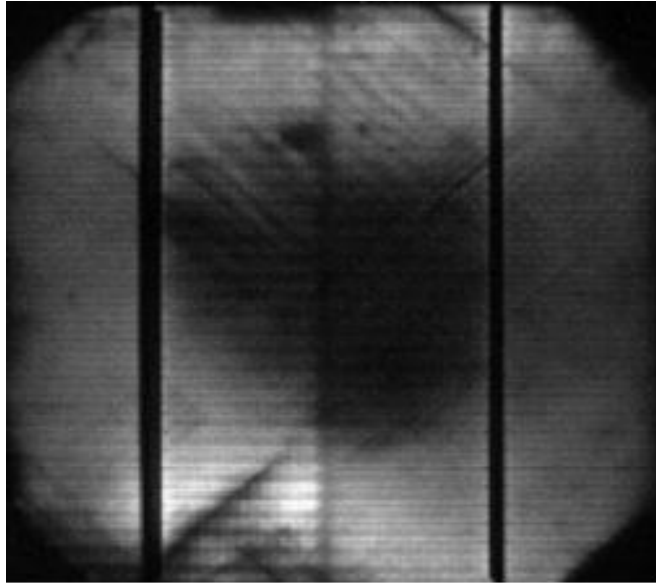
Tento typ defektu vzniká při výrobě monokrystalických ingotů a způsobuje vznik oblastí generujících nižší hodnoty fotoelektrického proudu. Tyto oblasti jsou orientovány do tvaru soustředných kružnic. Podstata vzniku vychází z vnikání příměsí (nejčastěji kyslíku) do taveniny monokrystalického křemíku při rotačním pohybu podle Czochralského metody viz kapitola 2.2. Každý foton dopadající na P-N přechod článku vygeneruje pár elektron-díra. Jestliže jsou v materiálu přítomny nežádoucí příměsí, vygenerovaný elektron či díra s nimi mohou rekombinovat a tím pádem snížit hodnotu generovaného fotovoltaického proudu, což má za následek snížení účinnosti a zvýšení závěrného proudu.



Obr. 3.2 Vírový defekt FV článku, převzato z [13]

Vnitřní pnutí

Jedná se o materiálový defekt, který vzniká při špatně řízeném procesu výroby monokrystalického křemíku pomocí Czochralského metody.



Obr. 3.3 Vnitřní pnutí materiálu, převzato z [13]

4.3.2 Procesní defekty (Processing induced defects)

Nehomogenita difúzní vrstvy

Vznik této nehomogenity je způsoben zatavením nečistot v průběhu procesu vytváření P-N přechodu FV článku procesem difúze, kdy se vytváří vrstva polovodiče typu N.



Obr. 3.4 Nehomogenita difúzní vrstvy, převzato z [13]

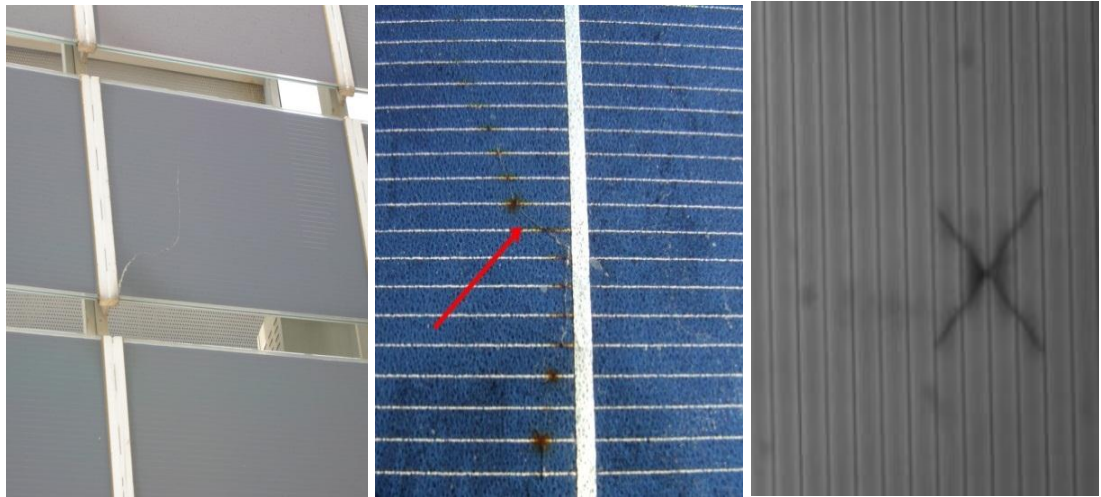
Mechanické poškození

Mechanickým poškozením FV panelů se nejčastěji rozumí:

- Poškrábání
 - Dochází ke zhmoždění vrchní vrstvy. Nachází-li se škrábanec v místě P-N přechodu, dochází k mikroskopickému lavinovému průrazu.
- Praskliny a mikropraskliny
 - Vznikají během manipulace s panelem.
- Chyba metalizace
 - Tento defekt negativně ovlivňuje odvádění proudu z panelu.
- Zanesení prachovými částicemi
 - Malé prachové částice jsou při výrobě difúzí přeneseny do struktury článku, kde způsobují poruchu materiálu.
- Skrytý lom
 - Tento nedostatek vzniká působením velkého tlaku na stěnu panelu. Na povrchu článku se pak může projevit i úplným odlomením poškozené části.
- Odštípnutí části článku
 - Defekt často vznikající nevhodným zacházením během diagnostiky a instalace panelu.
- Neobroušené hrany
 - Špatně upravené hrany způsobují zkratování přední a zadní strany FV panelu.

Tyto vady vznikají během manipulace s článkem, při závěrečné diagnostice nebo se mohou objevit až během instalace jednotlivých fotovoltaických panelů.

Na obrázku 3.5 jsou zobrazeny nejběžnější typy mechanických defektů.



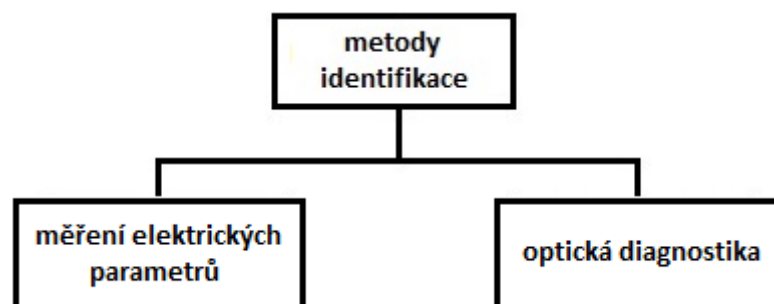
Obr. 3.5 Příklady mechanického poškození FV článků (zleva) poškozené krycí sklo, prasklina, detail skrytého lomu, převzato z [14]

4.4 Metody identifikace vad FV panelů

Testování má za úkol identifikovat co nejvíce možných vad na fotovoltaickém článku či panelu. Existuje mnoho metod zkoušení, z nich každá je více či méně vhodná pro určité typy defektů.

Tyto metody můžeme rozdělit:

- metody měření elektrických parametrů
- metody optické diagnostiky



Obr. 3.6 Rozdělení metod identifikace vad FV panelů

4.4.1 Metody měření elektrických parametrů

Do této skupiny metod identifikace vad patří metody založené na měření elektrických parametrů fotovoltaických článků.

Měření V-A charakteristik

Voltampérová charakteristika je jedním z prostředků pro popis a určování parametrů u různých součástek a zařízení viz kapitola 1.4 - V-A charakteristika.

Kvalita měřeného panelu se posuzuje podle velikostí parametrů v příslušných důležitých bodech V-A charakteristiky resp. podle jejich umístění. Naměřené hodnoty se porovnávají s hodnotami bezchybného panelu.

Flash test

Tento test se zakládá na měření výkonových charakteristik FV panelů. Výstupem testu jsou tzv. flashdata, která zahrnují např. měření výstupního špičkového výkonu, napětí naprázdno, proudu nakrátko, pracovního napětí, proudu a výkonu. Tyto naměřené parametry se porovnávají s parametry udávanými výrobcem. Testování probíhá v uměle nasimulovaných, pro funkci panelu ideálních podmínkách. Tyto podmínky zahrnují intenzitu osvětlení $1\,000\text{ W/m}^2$ se spektrem AM 1.5 (spektrum světla stejné jako u slunečního záření) a teplotu 25°C . Jsou dané normou IEC.

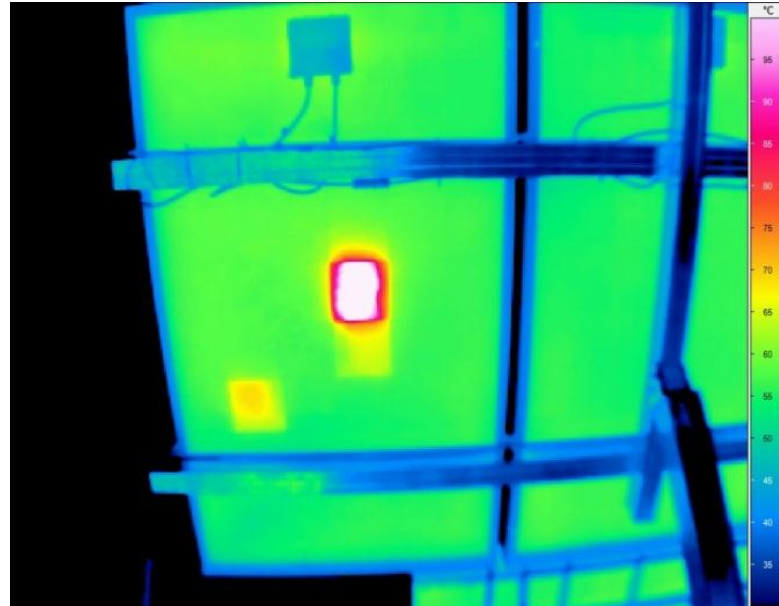
Na přístroje měřící výstupní výkon panelu jsou kladeny přísné nároky. Kalibrují se podle referenčních panelů, které jsou pravidelně ověřovány.

4.4.2 Metody optické diagnostiky

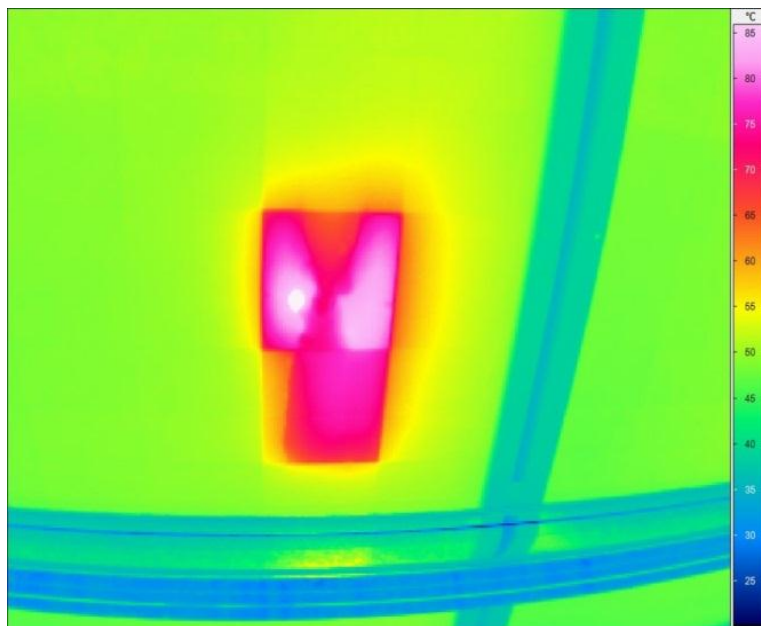
Tyto metody testování jsou založeny na detekci defektů v ploše článku za pomoci světla. Výhodou tohoto typu testování je vizuální zobrazení výsledků měření.

Měření termokamerou

Identifikace možných vad fotovoltaických panelů pomocí této metody je založena na měření teploty jejich povrchu. Měření se provádí pomocí termokamery a krom jiného má jednu velkou výhodu. Může se provádět i za chodu a není potřeba jakékoliv demontáže zařízení. Termokamera zjednodušeně funguje tak, že převádí neviditelné tepelné záření nacházející se v infračervené oblasti vycházející z povrchu fotovoltaického panelu na záření viditelné. Jednotlivé teplotní rozdíly jsou na přístroji rozlišeny pomocí barev. Vady způsobují změnu teploty na povrchu článku a jsou tak dobře viditelné. Často se také vlivem nečistot, zastínění nebo skrytých vad panely přehřívají. Tyto poruchy fotovoltaických panelů mají za následek celkové snížení výkonu. Nevýhodou je obtížná detekce místa poruchy. Není totiž možné detekovat přesné místo poškození panelu, nýbrž jen případný pokles výkonu celého zařízení. Dlouhodobé přehřívání vadného článku také vede k ohrožení ostatních správně fungujících článků nacházejících se v jeho blízkosti. Nárůst teploty v oblasti defektu o 10°C, než je výrobcem doporučená hodnota, znamená až 50% snížení životnosti celého zařízení.



Obr. 3.7 Příklad zviditelnění defektu FV panelu pomocí termokamery, převzato z [14]



Obr. 3.8 Detail defektu FV panelu zobrazený termokamerou, převzato z [14]

Metoda LBIC (Light Beam Induced Current)

Tato metoda patří mezi nejrozšířenější způsoby diagnostiky. K identifikaci vad se zde využívá svazku světelného záření, které vychází z LED diody nebo z laseru. Tento zdroj záření se pohybuje těsně nad povrchem článku, na který je zaostřen světelný svazek. Měří se proudová odezva článku, pomocí které se určí rozložení proudu. Pokud se ozáří místo, kde se nachází nějaký defekt, výstupní proud z článku prudce poklesne. Tímto způsobem se vytvoří tzv. proudová mapa, která je jakýmsi modelem chování měřeného vzorku v jeho jednotlivých částech. Spektrum světelného zdroje ovlivňuje hloubku vniku záření do článku. Z tohoto důvodu je možné identifikovat defekty v různých vrstvách.

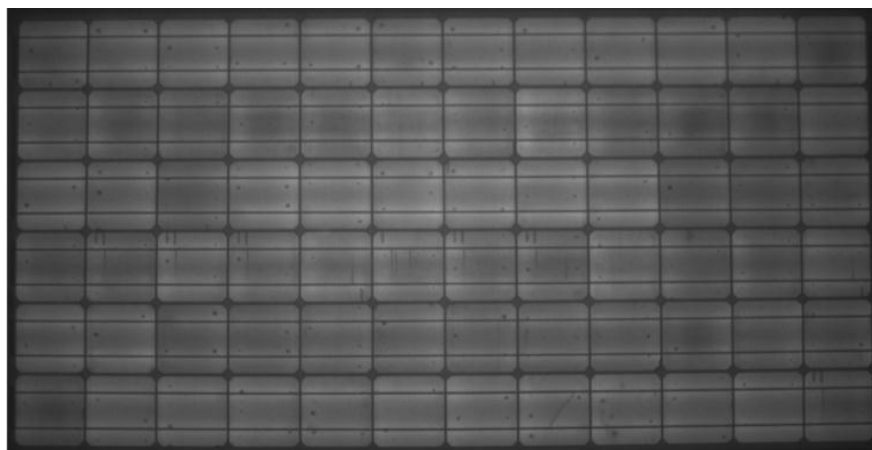
Přesnost vytvořených proudových map závisí hlavně na použitém zdroji záření, tím pádem na hloubce vniku a také na kroku s jakým se měřený vzorek skenuje. Při detailní analýze může měření trvat řádově i několik hodin.

Metoda elektroluminiscence (ELCD test)

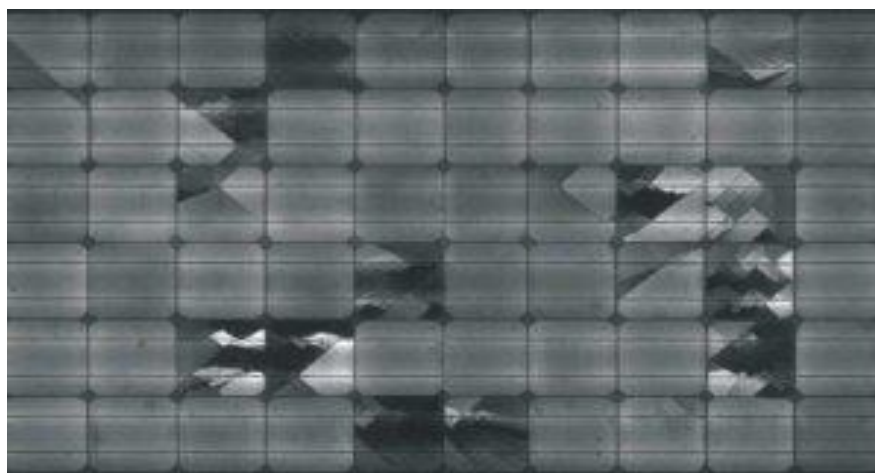
Tento způsob testování umožňuje odhalit přítomnost procesních a materiálových vad FV panelů vzniklých ve výrobě nebo při manipulaci. Tímto způsobem se mohou detekovat vady nezjistitelné jinými metodami testování (termokamera, flash test, VA char.). Elektroluminiscence je světelná emise záření vznikající při zářivé rekombinaci křemíku.

Princip vychází z reciproční schopnosti fotovoltaického článku z hlediska funkce jako plošné polovodičové diody. Článek dokáže přeměnit světelnou energii na energii elektrickou, ale i naopak. Připojíme-li k FV článku v propustném směru zdroj elektrické energie, začne se zvyšovat energie mezi jednotlivými vodivostními pásy ve struktuře křemíku a při překročení energetické hladiny nastane emise světelného záření z povrchu článku. Toto záření se detekuje CCD čipem pro snímání obrazu a převádí se do viditelného spektra pomocí vhodného zařízení. Defekty materiálu zjistitelné touto metodou se projeví jako místa emitující malou hodnotu záření nebo neemitují záření vůbec.

Na obrázku 3.3 je zobrazen panel pomocí metody fotoluminiscence, který neobsahuje žádné defekty. Obrázek 3.4 naopak zobrazuje panel obsahující jasně viditelné poruchy. Patrné je využití šedého odstínu barev. Tmavá místa znázorňují defekty. Jsou to místa s minimální nebo žádnou proudovou hustotou. Naopak světlejší místa představují oblasti, kde je proudová hustota větší. V těchto místech je panel v pořádku a dochází zde k zářivé rekombinaci.



Obr. 3.9 Metoda elektroluminiscence (panel bez vad), převzato z [12]



Obr. 3.10 Metoda elektroluminiscence (vadný panel), převzato z [11]

Metoda fotoluminiscence

Fotoluminiscenční metoda je téměř identická s metodou elektroluminiscence. Liší se pouze ve vnějším zdroji energie, kterým je zde světelné záření o známé vlnové délce. Snímací CCD čip musí obsahovat optický filtr, který toho záření dodávané z vnějšího zdroje odfiltruje. Pro tento typ testování se tedy dá použít stejné vybavení jako pro testování pomocí metody elektroluminiscence.

Metoda luminiscenční mikroplazmy

Vlivem závěrného proudu fotovoltaického článku dochází ke vzniku luminiscenčních mikroplazem. Tyto mikroplazmy vznikají v místech lokálních defektů krystalové mřížky P-N přechodu a negativně ovlivňují velikost závěrného proudu a průrazného napětí. Nejčastěji se tyto nedokonalosti objevují na hranách FV článků.

K detekci defektů za pomoci této metody je zapotřebí stejného vybavení jako pro měření metodou elektroluminiscence nebo fotoluminiscence s tou výjimkou, že napětí bude k článku připojeno v závěrném směru. V takovém případě dojde v místech lokálních poruch ke vzniku mikroplazmy. Velikost závěrného proudu P-N přechodu je přímo úměrná počtu viditelných center mikroplazmy. Mikroplazma se projevuje emisí světelného záření. Toto světelné záření se zaznamenává pomocí kamery s vhodným CCD čipem a pak se dále zpracovává.

Při tomto měření je potřeba si dávat pozor na velikost měřicího závěrného proudu a závěrného napětí. Při překročení jeho maximální hodnoty dojde k destruktivnímu lavinovému průrazu P-N přechodu a celý článek je tak znehodnocen.

Metoda vizuální kontroly

Jde o metodu kontrolování fotovoltaických panelů pouhým zrakem. Ano, mnoho vad vyskytujících se na povrchu panelů je možné identifikovat i tímto triviálním způsobem. Například větší praskliny a lomy jsou dobře zaregistrovatelné i pouhým okem.

Snížení účinnosti a s tím související problémy může lehce způsobit i jakékoliv zastínění panelu např. úchytem pro montáž. Tento nedostatek je také možné zjistit pouhým pohledem na takovýto fotovoltaický panel.

Provádění kontroly tímto triviálním způsobem může ušetřit spoustu času osobám pověřeným ke kontrole fotovoltaických panelů pomocí složitých metod a ušetří spoustu peněz výrobcům, neboť tato forma kontroly nevyžaduje žádné speciální přístroje, nýbrž stačí pouhý lidský zrak.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se se základními druhy fotovoltaických článků a s jejich vlastnostmi, vysvětlení jejich technologie výroby a popis možných metod identifikace různých vad.

V úvodní kapitole jsem nejdříve nastínil počátky vývoje fotovoltaických článků a historii objevu fotoelektrického jevu. Je zde popsáno rozdělení fotoelektrického jevu včetně popisu principu jevu fotovoltaického, který se řadí mezi fotoelektrický jev vnitřní. Dále jsem zde popsal strukturu fotovoltaického článku, příklady fotoelektrických ztrát a možnosti jejich snížení a základní parametry fotovoltaického článku včetně VA charakteristiky.

Následující část této práce se zaměřuje na technologii výroby používaných druhů fotovoltaických článků a panelů. Zde jsem uvedl jeden z možných postupů výroby základní suroviny pro výrobu FV článků – čistého křemíku. Dále je zde zmíněno rozdělení základních používaných typů fotovoltaických článků dle technologie jejich výroby a popis technologického postupu jejich kompletace. Existující používané typy fotovoltaických panelů mají malou účinnost. Panely na bázi krystalického křemíku mají účinnost pohybující se zhruba kolem 14-20%. Polykrystalické panely jsou levnější, ale mají menší účinnost (15%) než dražší monokrystalické články s účinností pohybující se kolem 18-20%. V některých aplikacích se používají i tenkovrstvé panely z amorfního křemíku. Tyto panely se vyznačují tenkým profilem, malou hmotností a možností panel ohýbat. Jejich nevýhoda je však dost malá účinnost (8-10%). V současné době se vyvíjejí nové technologie, které se snaží zvyšovat účinnost FV panelů, ale zároveň tyto technologie jsou a budou extrémně drahé. Z tohoto důvodu se využívají nejvíce v kosmických aplikacích, kde není cena limitujícím faktorem.

Poslední kapitola se zabývá možnými metodami identifikace různých vad fotovoltaických panelů a jejich popisem. Jsou zde popsány různé typy defektů, vznikající již při výrobě nebo při manipulaci, převozu či instalaci. Pro účely testování fotovoltaických panelů se používá mnoho diagnostických metod. Tyto metody se vybírají podle typu zjišťovaného defektu (každá metoda je vhodná pro jiný typ defektu). Metod pro identifikaci vad fotovoltaických panelů je mnoho. Podle mého názoru je nejlepší metoda LBIC, protože se pomocí ní dokáže sestavit model chování panelu v jeho určitých částech. Tato diagnostika se může provádět i v různých hloubkách materiálu a tím pádem se dají zjistit vady v celém

článku. Záleží pouze na použité vlnové délce (hloubka vniku) světelného zdroje. Jako druhá nejlepší metoda je měření pomocí termokamery. Touto metodou se dají zjistit defekty fotovoltaických panelů v terénu, a to bez jakéhokoliv přerušení činnosti. Výhodou je rychlá diagnostika a vizuální zobrazení naměřených výsledků.

Fotovoltaika má mnoho výhod. Je to obnovitelný zdroj energie a ke své činnosti potřebuje pouze dopadající světelné záření, je to prakticky nevyčerpatelný zdroj energie. Panely dosahují vysokých dob životnosti a při své činnosti nevznikají žádné škodlivé látky či emise. Při jejich činnosti nevzniká ani žádný hluk a panely nejsou nijak náročné na instalaci.

Na druhé straně existuje mnoho nevýhod fotovoltaických systémů. Těmi může být například nízká průměrná intenzita slunečního záření celoročně. Průměrná roční doba slunečního svitu je také docela krátká. V průběhu roku dochází i ke kolísání vyrobeného výkonu vlivem kolísání intenzity záření. Sériové vyráběné fotovoltaické panely mají malou efektivitu účinnosti přeměny světelné energie na elektrickou a naopak vysoké pořizovací náklady. V poměru k ceně jsou tedy fotovoltaické panely poměrně drahou záležitostí.

Seznam obrázků

- 1.1 *Rozdělení fotoelektrického jevu*
- 1.2 *Fotoemise*
- 1.3 *Vliv frekvence na uvolnění elektronu*
- 1.4 *Fotovoltaický jev*
- 1.5 *Fotovodivost*
- 1.6 *Řez fotovoltaickým článkem a princip jeho činnosti*
- 1.7 *Texturace povrchu*
- 1.8 *Metoda PERC*
- 1.9 *Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku*
- 2.1 *Výroba čistého křemíku*
- 2.2 *Křemíkové ingoty*
- 2.3 *Polykrystalický fotovoltaický panel*
- 2.4 *Monokrystalický fotovoltaický panel*
- 2.5 *Amorfni fotovoltaický panel*
- 2.6 *Skladba fotovoltaického panelu*
- 3.1 *Rozdělení defektů FV panelů*
- 3.2 *Vírový defekt FV článku*
- 3.3 *Vnitřní pnutí materiálu*
- 3.4 *Nehomogenita difúzní vrstvy*
- 3.5 *Příklady mechanického poškození FV článků*
- 3.6 *Rozdělení metod identifikace vad FV panelů*
- 3.7 *Příklad zviditelnění defektu FV panelu pomocí termokamery*
- 3.8 *Detail defektu FV panelu zobrazený termokamerou*
- 3.9 *Metoda elektroluminiscence (panel bez vad)*
- 3.10 *Metoda elektroluminiscence (vadný panel)*

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2013-1-28]. Dostupné z www: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>>.
- [2] *Fotovoltaický jev* [online]. [cit. 2013-2-3]. Dostupné z www: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>>.
- [3] *Fotovoltaický článek* [online]. [cit. 2013-3-3]. Dostupné z www: <<http://www.nemakej.cz/fotovoltaicky-clanek.php>>.
- [4] *ASB Fotovoltaické články – historie a současné trendy vývoje* [online]. [cit. 2013-3-10]. Dostupné z www: <http://www.asb-portal.cz/?article_print=2262>.
- [5] *FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNE = ELEKTRINA ZO SLNKA* [online]. [cit. 2013-3-29]. Dostupné z www: <http://www.poziadavka.sk/katalogy/www.poziadavka.sk_2029_103873.pdf>
- [6] Fotovoltaický článek [online]. [cit. 2013-4-2]. Dostupné z www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8DI%C3%A1nek#V.C3.BDroba_sol.C3.A1rn.C3.ADch_.C4.8DI.C3.A1nk.C5.AF>.
- [7] Výroba fotovoltaického článku [online]. [cit. 2013-4-25]. Dostupné z www: <<http://fotovoltaika.falconis.cz/fotovoltaika/vyroba.php>>.
- [8] Fotovoltaika – technologie [online]. [cit. 2013-5-7]. Dostupné z www: <<http://www.sunnypower.cz/cs/fotovoltaika/fotovoltaika---technologie>>.
- [9] *Fotovoltaické panely* [online]. [cit. 2013-5-7]. Dostupné z www: <<http://www.nemakej.cz/Fotovoltaicke-panely-k0101>>.

- [10] *Solární panely* [online]. [cit. 2013-5-7]. Dostupné z www:
<<http://www.acc-silicones.cz/applications1/solarpanels.ashx>>.
- [11] TechPark vydavatelství, *SolarTechnika* [online]. [cit. 2013-5-7]. Dostupné z www:
<<http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/kontrola-kvality-fotovoltackych-modulu.html>>.
- [12] HRZINA, P. *Možnosti v diagnostice fotovoltaických panelů a elektráren*, [online]. [cit. 2013-5-7]. Dostupné z www:
<<http://k315.feld.cvut.cz/elen/sites/default/files/7-Hrzina.pdf>>.
- [13] KOPUNEC, V. *Analytické metody solárních panelů a systémů* [online]. [cit. 2013-5-10]. Dostupné z www:
<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38558>.
- [12] Defekty a závady fotovoltaických panelů ve fotografii [online]. [cit. 2013-5-10]. Dostupné z www: <<http://www.vaseenergie.cz/blog/defekty-a-zavady-fotovoltackych-panelu-ve-fotografii/>>.
- [15] TZB-ENERG, *Měření fotovoltaiky termokamerou* [online]. [cit. 2013-5-12]. Dostupné z www: <http://www.tzb-energ.cz/mereni-fotovoltaiiky.html>
- [16] Fotovoltaické články [online]. [cit. 2013-5-12]. Dostupné z www:
<<http://www.mmsolar.cz/index.php?option=com/content&view=article&id=5&Itemid=4>>.
- [17] Malapa, *ohybný amorfní fotovoltaický panel* [online]. [cit. 2013-5-13]. Dostupné z www:
<<http://www.malapa.cz/produkty/solarnienergie/SO26/#pictures/gallery/1/>>.
- [18] Fotovoltaické elektrárny, *fotovoltické články* [online]. [cit. 2013-5-15]. Dostupné z www: <<http://www.tribaselectric.cz/fotovoltacke-elektrarny>>.

- [19] LIBRA, M., POULEK, V.. Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie [online]. 2005 [cit. 2013-2-3]. Dostupné z www: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>.
- [20] JANDOVÁ, K. Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků [online]. [cit. 2013-5-20]. Dostupné z www: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10267.
- [21] LIBRA, Martin. POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie*. Praha : ISLA, 2009. 160s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [22] Libra, Martin a Vladislav Poulek: *Solární energie*. Vydala Česká zemědělská univerzita v Praze, červen 2005