

5 Fotovoltaika



5.1 Princíp priamej premeny slnečnej energie na elektrickú energiu

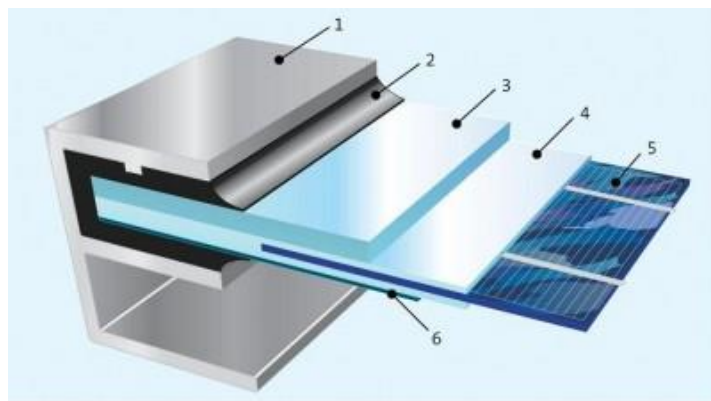
Fotovoltaický článok alebo solárny článok je veľkoplošná polovodičová súčiastka, ktorá priamo premieňa slnečnú energiu na energiu elektrickú pomocou fotoelektrického javu. (Fotoelektrický jav tiež nazývaný aj fotoelektrický efekt alebo fotoefekt je experimentálne pozorovaný jav, kedy svetlo vhodnej vlnovej dĺžky pri dopade na kov alebo polovodič vyráža z atómov látky elektróny, ktoré sa potom voľne pohybujú v látke a zvyšujú jej vodivosť resp. ju opustia). Fotovoltaické články majú mnoho uplatnení. Používajú sa na napájanie malých zariadení (napr. kalkulačky, solárne hračky), v kozmickom priemysle a taktiež vo veľkom sa začínajú využívať v energetickom priemysle.

V súčasnosti je najvyužívanejším materiálom na výrobu fotovoltaických článkov kremík. Táto surovina je štvrtá najpoužívanejšia surovina na svete. Na výrobu solárnych panelov sa však využíva približne len 1% z tohto množstva. Používa sa v niekoľkých podobách ktoré závisia od použitej výrobných technológií. Sú to tieto podoby: monokryštalický kremík, polykryštalický kremík, multikryštalický kremík a hydrogenizovaný amorfný kremík. Na výrobu fotovoltaických článkov sa tiež používajú iné prvky či zlúčeniny. Patrí medzi ne napr. arzenid gália, telurid kadmenný, sulfid kadmenný a v neposlednom rade rýchlo sa rozvíjajúce organické zlúčeniny.

5.2 Mechanická konštrukcia fotovoltaických článkov

Aby sa dosiahlo vysokej životnosti, musia sa články chrániť pred ničivými vplyvmi okolitého prostredia. Solárne články sa spravidla vkladajú do etylenvinylacetátovej (EVA) fólie. Predná strana sa navyše chráni vysoko priehľadným, špeciálne tvrdeným sklom, aby články boli chránené pred vetrom, dažďom, krupobitím a inými poveternostnými vplyvmi. Súčasne má sklo prepúšťať na článok čo najviac slnečného svetla. Zadná strana sa uzavrie viacvrstvou, vysoko pevnou fóliou z umelej hmoty alebo druhou sklenenou doštičkou a priestor medzi sklami sa utesní.

Väčšina modulov sa pre zvýšenie stability a lepšiu manipuláciu opatrí kovovým rámom väčšinou z hliníka. V poslednej dobe sa vo väčšej miere začínajú používať bezrámové moduly (tzv. lamináty), pretože sa dajú racionálne montovať a okrem toho možno vynechaním rámu ušetriť materiál, a tak ušetriť energiu pri výrobe a tým pádom aj náklady. Okrem štandardných modulov sa vyrábajú aj flexibilné moduly a to najmä pre kempovanie a karavany. Vďaka kvalitnému spracovaniu je dnes trvanlivosť solárnych modulov natoľko dobrá, že výrobcovia môžu dávať záruky na zachovanie výkonu v rozmedzí 5 až 25 rokov.



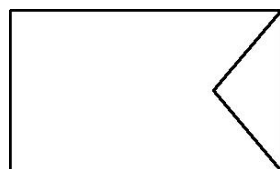
Obrázok 17 Mechanická konštrukcia solárneho modulu s rámom: 1- hliníkový rám, 2-tesnenie, 3- tvrdené sklo, 4- fólia EVA, 5- fotovoltaický článok, 6- Vodotesná fólia z umelej hmoty

Zdroj: (<http://www.neosolar.cz/userfiles/image/eva%20folie%202.jpg>)

5.3 Fotovoltaika – základné pojmy

Solárne panely

Solárne panely, alebo moduly sú najdôležitejšou časťou fotovoltaického systému a preto je nutné vybrať ten najoptimálnejší model a typ. Na obrázku 19 je prezentované delenie fotovoltaických článkov podľa materiálu použitého na výrobu, z ktorých sú solárne panely vyrábané :

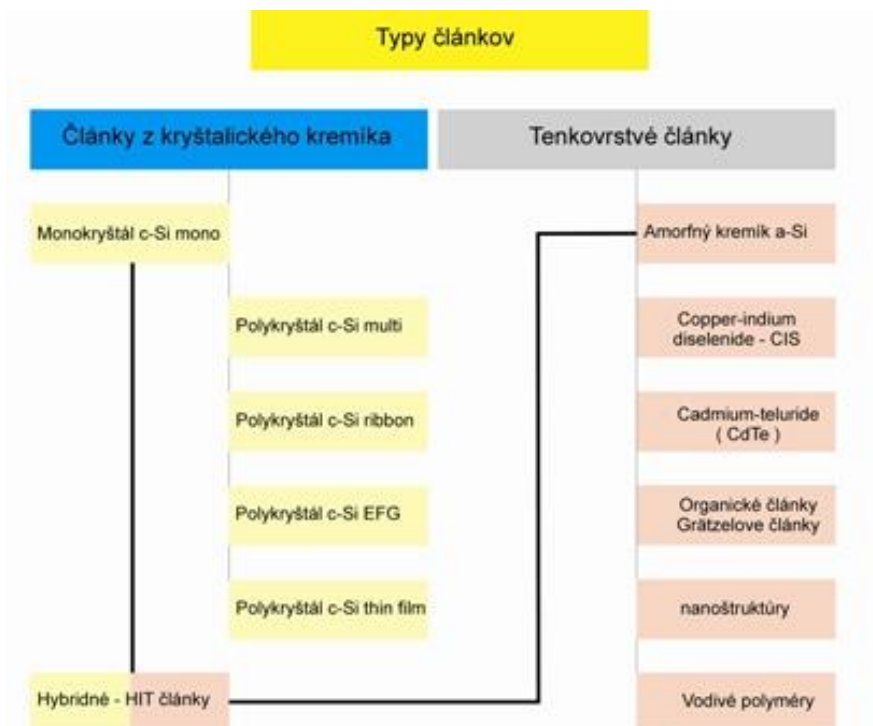


Obrázok 18 Schematická značka fotovoltaického panelu

Zdroj: (<http://www.daia.sk>)

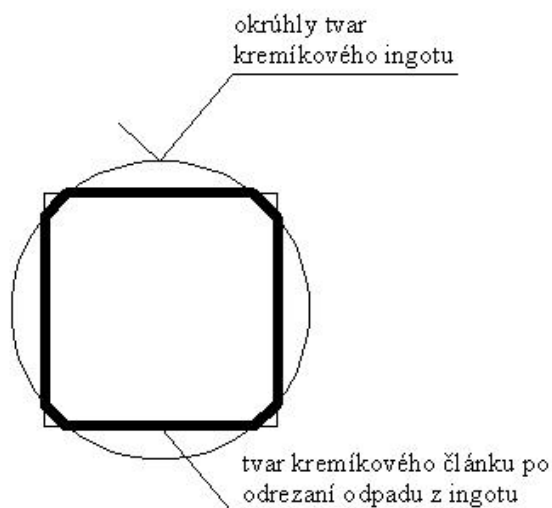
Najpoužívanejšie panely sú vyrábané z kremíka (Si). Delia sa na monokryštalické, polykryštalické a amorfné resp.tenkovrstvé. Proces ich výroby je zachytený v časti "niečo o fotovoltaike". Najnáročnejšie z nich sú monokryštalické panely vzhľadom na ich náročnú výrobu . To je aj dôvod prečo sú cenovo najdrahšie, ale zároveň najúčinnnejšie .

Ďalším zástupcom kryštalických panelov sú polykryštalické panely. Proces ich výroby je rýchlejší a menej náročný na energiu . Na rozdiel od monokryštalického panelu sa články nerežú z okrúhlych ingotov, ale z pravidelných kvádrov, takže tvar článku je celý štvorec .Po osadení do rámu panelu využijeme tým pádom väčšiu plochu než pri monokryštále . Účinnosť polykryštalických kvalitných panelov sa hýbe od 13% do 16% .



Obrázok 19 Typy fotovoltaických článkov podľa materiálu použitého na výrobu,

Zdroj: (<http://www.daia.sk>)

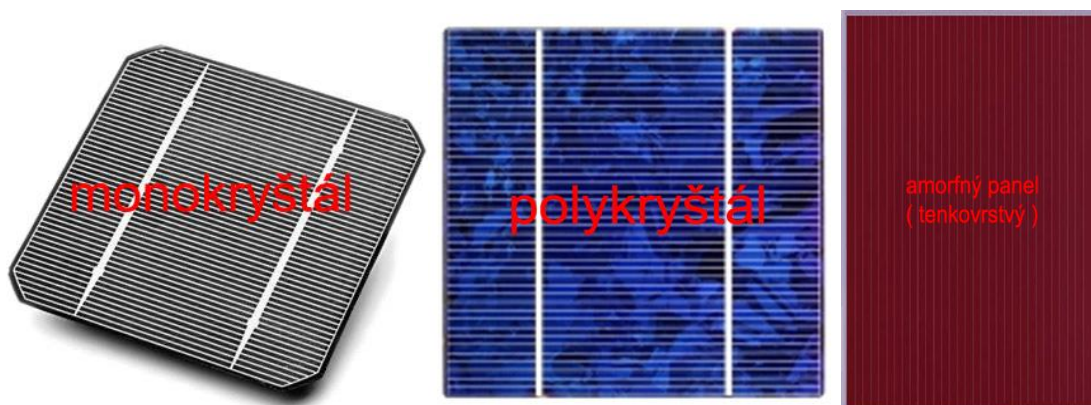


Obrázok 20 Znáozornenie tvaru monokryštalického článku, po jeho odrezaní

z ingotu kruhového prierezu, Zdroj: (<http://www.daia.sk>)

Ďalším zástupcom kryštalických panelov sú polykryštalické panely . Proces ich výroby je rýchlejší a menej náročný na energiu . Narozdiel od monokryštalického panelu sa články

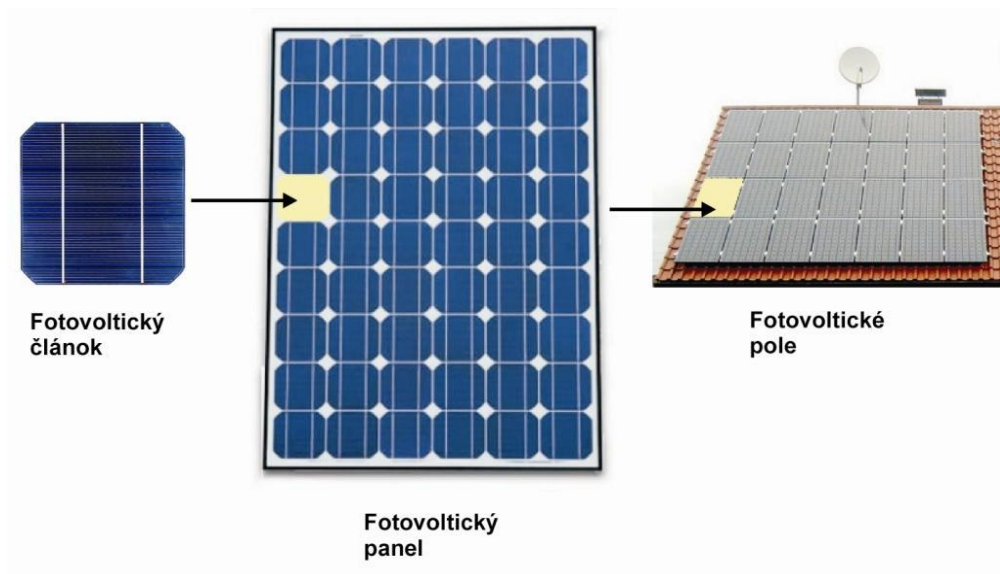
nerozú z okrúhlych ingotov, ale z pravidelných kvádrov, takže tvar článku ja celý štvorec .Po osadení do rámu panelu využijeme tým pádom väčšiu plochu než pri monokryštále . Účinnosť polykryštalických kvalitných panelov sa hýbe od 13 % do 16 % .



Obrázok 21 Znáznornenie rôznych druhov fotovoltaických článkov - monokryštál, polykryštál a tenkovrstvový amorfný článok, Zdroj: (<http://www.daia.sk>)

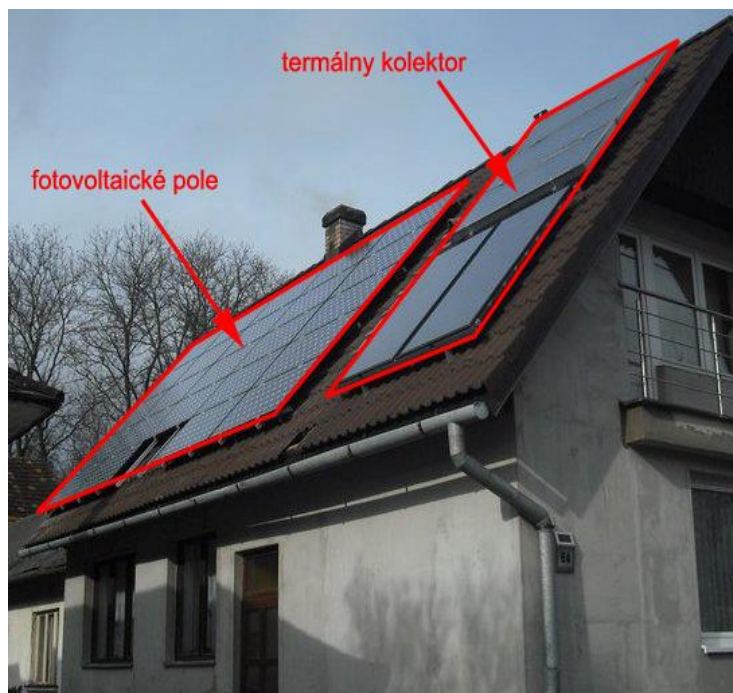
Tenkovrstvé články zastávajú významné miesto na poli fotovoltaických článkov .Najviac používaným zástupcom z rodiny tenkovrstvových panelov je amorfný kremík . Podobne ako u polykryštalických paneloch aj tu sa použije menej suroviny (kremíka), keďže sa naniesie iba 0,3 mikrometra hrubá vrstva kremíka. Táto hrúbka nám umožňuje vyrobiť flexibilné fotovoltaické panely, ktoré sa hodia na mobilné aplikácie, alebo tam, kde je požiadavka na nižšiu hmotnosť systému. Aj napriek slabšej účinnosti, ktorá je okolo 5 % až 7 % dosahuje tento systém veľmi dobré výsledky . Je to spôsobené tým, že lepšie znáša vyššie teploty a okrem tento typ panelov vie lepšie zužitkovať difúzne žiarenie . Pokiaľ nie sme obmedzený plochou, ktorú nám poskytuje strecha, tenkovrstvová technológia nám poskytne stabilnejší výnos počas celého roka.

Dôležitým parametrom je účinnosť článku a modulu. Užívateľ a by mala zaujímať najmä účinnosť panelov a samozrejme cena .Treba rozlišovať medzi účinnosťou fotovoltaických článkov a účinnosťou modulov resp. panelov . Účinnosť článku bude vždy vyššia ako modulu resp. panelu . Je to dané tým, že články pospájané do reťazcov tvoria modul a práve spoje a prepojenia tvoria prvé straty v systéme . Ďalšie straty spôsobuje kabeláž, ktorým sú pospájané moduly do fotovoltaického poľa (PV array).



Obrázok 22 Znáozornenie fotovoltaiického článku, panelu a fotovoltaiického poľa

Výrobca panelov udáva aj ďalšie parametre, ktoré hovoria o ďalších vlastnostiach panelov. Určite je dobre ak si zákazník porovná viac ekvivalentných výrobkov a rozhodne sa nielen podľa ceny. Častým omylom, ktorý sa vyskytuje v médiách aj medzi ľuďmi je zámena fotovoltaiických panelov s termickými kolektormi. V súčasnosti sú zatiaľ viac rozšírené termické kolektory na ohrev teplej úžitkovej vody a vody v radiátoroch. Termické kolektory majú aj dlhšiu históriu a boli využívané najmä v dovolenkových destináciách, kde sme ich mohli vídať najmä na strechách hotelov.









Obrázok 23 Inštalácia fotovoltaiického poľa a slnečných termálnych kolektorov

Ďalším dôležitým údajom pre návrh fotovoltaického systému je plocha, ktorú máme k dispozícii. Tabuľka 9 popisuje vzťah medzi plochou, výkonom, typom panelov a účinnosťou panelov .

Tabuľka 9 Parametre potrebné na postavenie fotovoltaickej elektrárne s výkonom 1kWp

Zdroj: (http://www.daia.sk/index.php?option=com_content&view=article&id=7:pv-panely&catid=11:komponenty-fotovoltaickych-systemov&Itemid=14)

Materiál použitý na výrobu panelu	Plocha pri danom type panelu potrebná pre 1kWp	Účinnosť panelu	Zházornenie plochy
Monokryštalický kremík	7 až 9m ²	11 – 16%	
Monokryštalický kremík panely s vysokou účinnosťou	6 až 7m ²	17 – 19%	
Polykryštalický kremík s technológiou EFG	8 až 9m ²	10 – 14%	
CIS – Copper indium diselenid	9 až 11m ²	6 – 8%	
CdTe – Cadmium telluride	12 až 17m ²	6 – 8%	
Amorfny kremík – thin film	16 až 20m ²	4 – 7%	

5.4 Fyzikálna podstata fotovoltaickej premeny energie

K fotovoltaickej premene energie elektromagnetického žiarenia na energiu elektrickú dochádza v polovodičových fotovoltaických (PV) článkoch. Najbežnejšie sú PV články na báze kryštalického kremíka, preto fyzikálnu podstatu tejto transformácie energie vysvetlíme práve na nich, pre PV články na báze iných polovodičov je situácia analogická. Podľa typu nosiča náboja delíme polovodiče na vlastné a prímesové. Prímesové polovodiče môžu byť typu N (majoritnými nosičmi náboja sú elektróny) alebo typu P (majoritnými nosičmi sú diery, ktoré sa chovajú ako častice s kladným nábojom). Podrobný popis procesov prebiehajúcich v polovodičoch a popis chovania elektrónov a dier je veľmi náročný. Uvedený popis je možné nájsť v ktorejkoľvek monografii o fyzike pevných látok.

Kremík (atóm Si) obsahuje 14 elektrónov, má kryštalovú štruktúru diamantu a je obklopený štyrmi najbližšími susedmi. Posledné štyri elektróny (valenčné) vytvárajú s týmito susedmi kovalentné väzby. Energia voľného elektrónu, nepodliehajúci žiadnym silám, môže nadobúdať ľubovoľné hodnoty. Oproti tomu energia elektrónu v kryštály kremíka nadobúda len určité hodnoty v dôsledku pohybu v poli periodického potenciálu. Tieto hladiny energie sú rozdelené do pásov, tzv. pásy dovolených energií, ktoré sú oddelené tzv. pásmi zakázaných energií.

Dôležitú úlohu zohrávajú tieto pásy: valenčný pás (za veľmi nízkych teplôt posledný obsadený), posledný zakázaný pás a vodivostný pás (za veľmi nízkych teplôt prvý neobsadený). Valenčný pás pozostáva z energetických stavov valenčných elektrónov. Keďže týchto stavov je rovnaký počet ako valenčných elektrónov v celom kryštály, budú za veľmi nízkych teplôt všetky obsadené. Po valenčnom páse nasleduje pás zakázaných energií, tzn. že žiadny elektrón nemôže mať energiu, ktorá zodpovedá stavu v tomto páse. Ďalej nasleduje pás vodivostný, ktorého stavy za veľmi nízkych teplôt nie sú obsadené. Vo vnútri pásov dovolených energií sú malé rozdiely medzi jednotlivými energetickými hladinami.

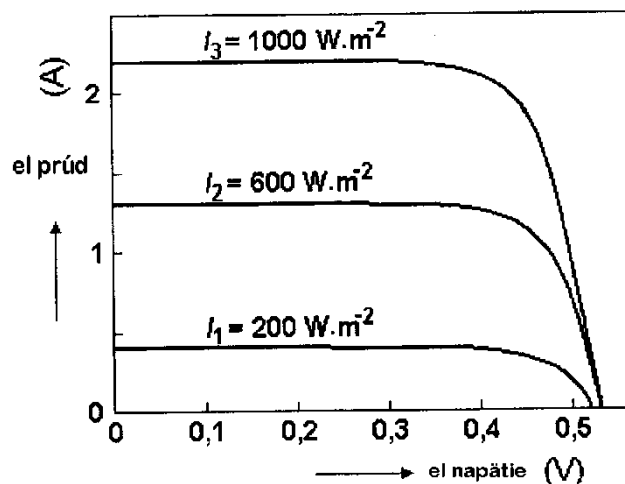
Najvyššia energetická hladina valenčného pásu sa označuje E_V , najnižšiu hladinu vodivostného pásu označujeme E_C . Šírka zakázaného pásu sa označuje ako $AE_G = E_C - E_V$. V najnižšom energetickom stave valenčné elektróny obsadzujú všetky hladiny vo valenčnom páse, nemôžu sprostredkovať vedenie elektrického prúdu. Dodaním napr. tepelnej alebo svetelnej energie sa niektoré elektróny uvoľnia od svojho atómu, čím v energetickej schéme prejdú do vodivostného pásu. Stanú sa elektrónmi, ktoré sa môžu v kryštály voľne pohybovať a môžu sprostredkovať vedenie elektrického prúdu. Ak nahradíme v kryštály kremíka niektoré atómy Si atómami prvku V. skupiny Mendelejovej periodickej tabuľky prvkov (napr. As, P, Sb), ktoré majú 5 valenčných elektrónov, budú 4 z nich viazané kovalentnou väzbou s najbližšími atómami Si. Piaty elektrón bude slabo viazaný k atómu prímеси. Takýto polovodič nazývame polovodičom typu N. Dodaním malej energie sa tento elektrón "odtrhne", čo sa v energetickej schéme prejaví tak, že prejde do vodivostného pásu. Tieto päťmocné atómy sa nazývajú donory, pretože dodávajú voľné elektróny. Prítomnosť atómov takejto prímеси sa prejaví v energetickej schéme vznikom lokálnych energetických hladín, ktoré ležia v zakázanom páse v blízkosti dolnej hladiny vodivostného pásu E_C .

Ak nahradíme v kryštály kremíka niektoré atómy Si atómami prvku III. skupiny periodickej tabuľky prvkov (napr. B, Al, Ga), tieto prímеси obsahujú iba 3 valenčné elektróny. Jedna väzba týchto atómov nebude zaplnená a bude sa správať ako diera. V dôsledku tepelnej energie môže do nezaplnenej väzby preskočiť valenčný elektrón od susedného atómu Si a diera sa môže pohybovať kryštálom. Takýto polovodič nazývame polovodičom typu P a prímеси, ktoré tvoria záchytné centrá pre elektróny nazývame akceptory.

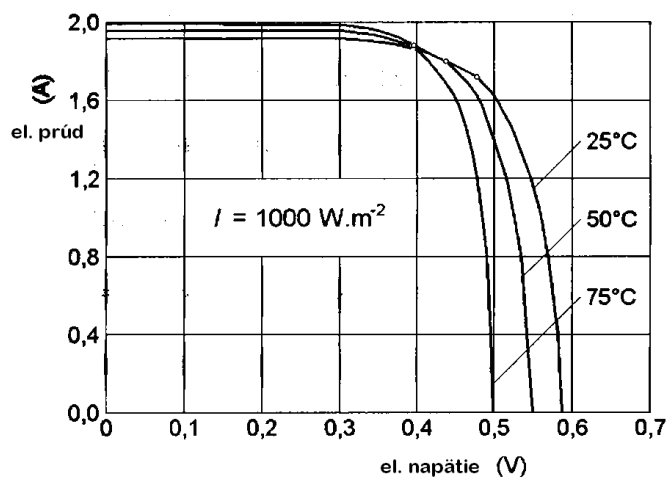
Rozhranie medzi dvomi polovodičmi P a N nazývame PN priechod. Takto popísaný priechod PN môže byť jednoduchou polovodičovou diódou.

K fotovoltaickej premene energie dochádza v polovodičových fotovoltaických článkoch, kde sa energia dopadajúcich fotónov mení na elektrickú energiu. Jedná sa o veľkoplošnú diódu, priechod PN je orientovaný kolmo k čelnej ploche medzi prednou a zadnou stranou. Pokiaľ na fotovoltaický článok dopadajú fotóny s väčšou energiou ako energia, ktorá zodpovedá šírke zakázaného pásu, tieto fotóny generujú páry electron-diera. Tak odovzdávajú svoju energiu a pohlcujú sa. Prípadný prebytok energie väčšinou odovzdajú kmitom mriežky a takto ho premenia na teplo, ktoré vedie k ohrevu materiálu polovodiča. Páry elektrón-diera generované v oblasti priechodu PN sú od seba oddelené elektrickým poľom E medzi viazanými priestorovými nábojmi, diery sú zrýchlené v smere poľa, elektróny opačne. Medzi opačnými pólmi PV článku sa objaví elektrické napätie a po zapojení do elektrického obvodu tečie obvodom jednosmerný elektrický prúd. PV článok sa stáva zdrojom elektrickej energie.

Na obr. 25 sú volt-ampérové charakteristiky PV článku na báze kryštalického kremíka zapojeného do elektrického obvodu. Jednotlivé krivky zodpovedajú rôznym intenzitám osvetlenia. Priesečníky kriviek so zvislou osou udávajú prúd nakrátko, zodpovedajú "nulovému" odporu vo vonkajšom obvode alebo skratovanie oboch pólův PV článku. Ak rastie odpor záťaže, pohybujeme sa od týchto bodov po krivkách smerom k rastúcemu napätiu (doprava). Priesečníky kriviek s vodorovnou osou udávajú napätie naprázdno, zodpovedajú "nekonečnému" odporu vo vonkajšom obvode alebo rozpojenie obvodu. Optimálna záťaž PV článku má taký odpor, pri ktorom pracovný bod leží v tom bode volt-ampérovej charakteristiky, v ktorom súčin napätia a prúdu má najväčšiu hodnotu. Obr. 24 zobrazuje ako sa volt-ampérové charakteristiky osvetleného PV článku na báze kryštalického kremíka menia s teplotou pri konštantnej intenzite osvetlenia. Je vidieť, že s rastúcou teplotou rastie prúd nakrátko ale klesá napätie naprázdno. Pri rastúcej teplote klesá maximálny výkon dodávaný PV článkom pri konštantnej intenzite osvetlenia a tak klesá aj účinnosť fotovoltaickej premeny energie.



Obrázok 24 Voltampérové charakteristiky osvetleného fotovoltaického článku pri rôznych intenzitách osvetlenia pri konštantnej teplote $t = 50^\circ\text{C}$, Zdroj: (Poulek,Libra 2009)



Obrázok 25 Voltampérové charakteristiky osvetleného fotovoltaického článku na báze kryštallického kremíka pri rôznych teplotách pri konštantnej intenzite osvetlenia $I = 1000 \text{ W.m}^{-2}$

Zdroj: (Poulek, Libra 2009)

5.5 Konštrukcia a výroba fotovoltaických článkov

Najviac rozšírené sú dnes fotovoltaické články na báze kremíka (Si -monokryštallické, polykryštallické i amorfné na báze tenkých vrstiev), pretože kremík má veľa výhod (Obr. 26). Je zastúpený v zemskej kôre dokonca ako druhý najrozšírenejší prvok. Je ľahko dostupný, nie je jedovatý a je najviac používaným a asi aj najlepšie preskúmaným polovodičom. V prírode sa vyskytuje väčšinou vo forme kremeňa alebo oxidu kremičitého (SiO_2). V tejto forme je mechanicky odolný a chemicky stabilný. Surový kremík sa vyrába z piesku redukciou uhlíkom v oblúkovej peci, kde dochádza k celému reťazcu chemických reakcií. Pokiaľ započítame iba konečné produkty, môžeme zjednodušene všetko vyjadriť jedinou rovnicou.

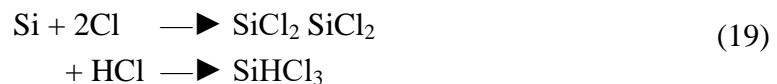


Obrázok 26 Polovodičový fotovoltaický článok na báze polykryštallického kremíka

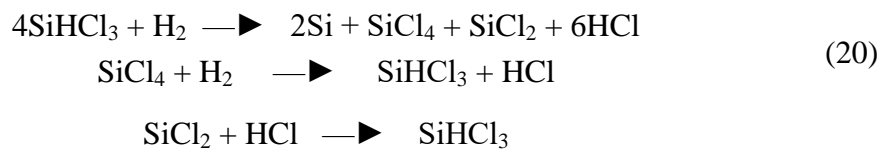
Zdroj: (Poulek, Libra 2009)

Do oblúkovej pece sa zhora vkladajú suroviny, ktorými sú piesok premiešaný s mletým karbonizovaným uhlím (koksom). Smerom dole stúpa teplota a v jednotlivých úrovniach prebiehajú chemické reakcie. Dole v zóne s teplotou cca $T \sim 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ sa hromadí roztavený

kremík, ktorý sa v pravidelných intervaloch odlieva. Takto získaný surový kremík hutnej kvality má čistotu až 99%, približne 1% nečistôt tvorí najviac prímiesi Fe, Al a C. Pre použitie v polovodičovej výrobe je však potrebná omnoho vyššia čistota. Preto je potrebné surový kremík vyčistiť a následne vytvoriť finálny polotovár pre použitie v ďalšej polovodičovej výrobe. K tomu účelu existujú rôzne technológie, napríklad jedna z nich je schématicky znázornená na obr.29. Prevodom na kvapalnú fázu a jej destiláciou je možné získať polotovár čistoty tzv. ppb (nečistoty rádovo 10^{-9}), ktorá je potrebná pre výrobu integrovaných obvodov. Pre výrobu PV článkov bežne postačuje aj nižšia čistota, tzv. čistota ppm (nečistoty rádovo 10^{-6}). Najpoužívanjšou technológiou je dnes technológia Siemens s chlórovým cyklom. Najprv prebehne prevod na trichlórorganosilán a jeho destilácia podľa zjednodušených rovníc



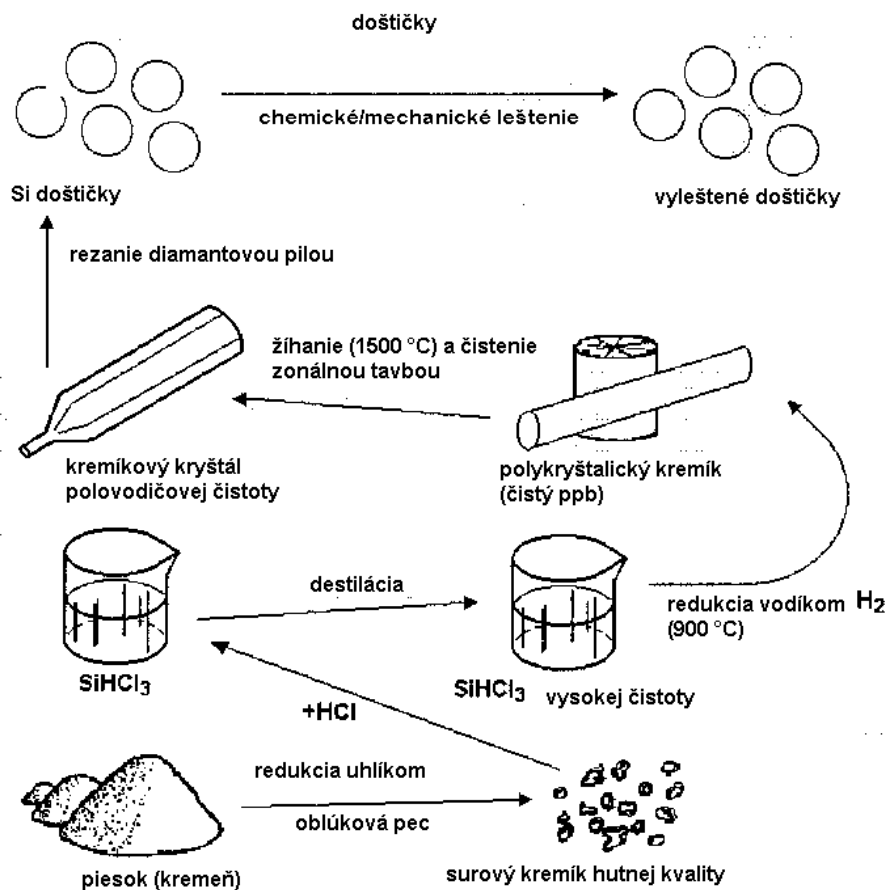
Potom sa z trichlórorganosilánu opäť vyredukuje čistý kremík podľa zjednodušených rovníc



Chlórový výrobný proces je náročný na spotrebu energie a na ochranu bezpečnosti obsluhy i životného prostredia. V súčasnosti sa vyvíjajú nové technológie výroby čistého kremíka, ktoré nepoužívajú chlórový cyklus a tým tieto problémy eliminujú. Tieto technológie sú v štádiu testovania a pokiaľ sa osvedčia, môžu podstatne znížiť energetickú náročnosť výroby čistého kremíka i jeho cenu. Po vyčistení vzniknú hrudky čistého kremíka. Hrudky čistého kremíku následne prechádzajú kontrolou elektrického odporu. Z tohto polotovaru je potrebné vytvoriť polykryštalické či monokryštalické ingoty.

Výroba polykryštalických ingotov je jednoduchšia. Materiál sa roztaví a naleje do formy, kde sa nechá pomaly definovanou rýchlosťou chladnúť. Chladnutie musí byť pomalé, aby sa vytvorili čo možno najväčšie monokryštalické zrná a aby bolo v materiály minimum dislokácií, pnutí a pod. Hranice zrn i ďalšie poruchy kryštálu tvoria pre elektróny potenciálne bariery, teda je potrebné ich prítomnosť minimalizovať. Výroba monokryštalických ingotov prebieha tzv. Czochralskiho metódou. Do taveniny s teplotou cca 1415 °C sa ponorí malý monokryštál ako zárodok. Ten sa veľmi pomaly z taveniny vyťahuje a pritom sa necháva otáčať okolo pozdĺžnej osi. Celý proces prebieha v inertnej atmosfére za zníženého tlaku.

Vzniknutý polykryštalický alebo monokryštalický ingot (obr. 27) sa nakoniec priečne reže na doštičky, ktoré tvoria základ PV článkov. V technológii rezania došlo v posledných rokoch k výraznému posunu kvality, najmä drôtové rezačky boli podstatne vylepšené. Zatiaľ čo skoršia technológia umožňovala rezať doštičky s minimálnou hrúbkou $d = 300 \mu\text{m}$, dnes je to až $d = 100 \mu\text{m}$. V rovnakom pomere sa zmenšil aj prierez. Polotovary z iných polovodičov ako z kremíku sa vyrábajú podobnými technológiami.



Obrázok 27 Schematické znázornenie postupu pri výrobe Si polotovaru pre výrobu PV článkov

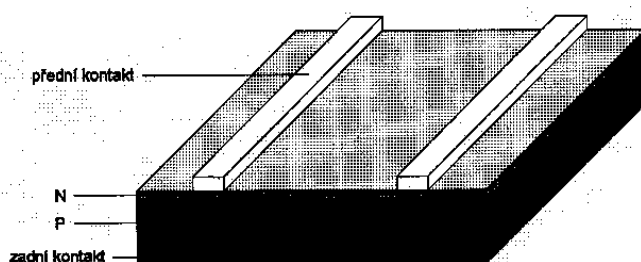
Zdroj: (Poulek, Libra 2009)



Obrázok 28 Kremikové ingoty - polotovary pre polovodičovú výrobu

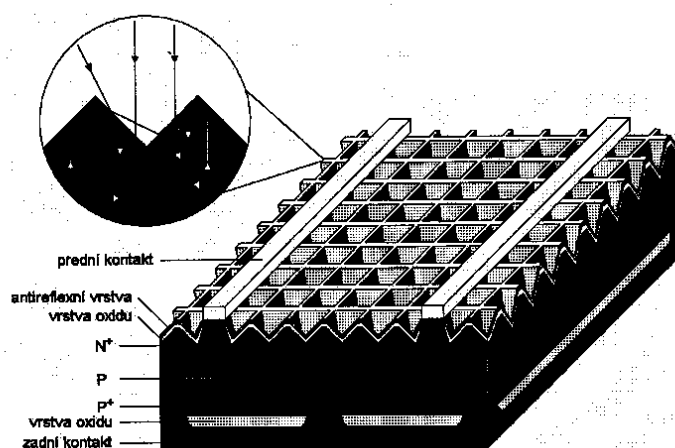
Zdroj: (Poulek, Libra 2009)

a) jednoduchý model



Obrázok 29 a) Schéma polovodičového fotovoltaického článku, Zdroj: (Libra – Poulek, 2009)

b) článok s vysokou účinnosťou



Obrázok 29 b) Schéma polovodičového fotovoltaického článku, Zdroj: (Libra – Poulek, 2009)

Schéma kremíkového PV článku je na obr. 29 a), b). V časti a) je schematicky znázornený jednoduchý model. Takto konštruovaný článok má nižšiu účinnosť fotovoltaickej premeny energie v dôsledku rekombinačných strát. Pre zvýšenie účinnosti slúži rada konštrukčných zdokonalení viditeľných v časti b). Antireflexná vrstva na prednej strane minimalizuje odraz, aby maximum fotónov vniklo do PV článkov a preniklo až do oblasti prechodu PN. Obojstranné PV články majú na zadnej strane rovnakú štruktúru ako na prednej strane, fotóny môžu dopadať súčasne z oboch strán a množstvo vyrobenej elektrickej energie je potom vyššie. Pre žiarenie dopadajúce na zadnú stranu je účinnosť fotovoltaickej premeny nižšia, pretože fotóny kratších vlnových dĺžok sú pohlcované už v silnejšej vrstve polovodičového substrátu a nedorazia až k prechodu PN.

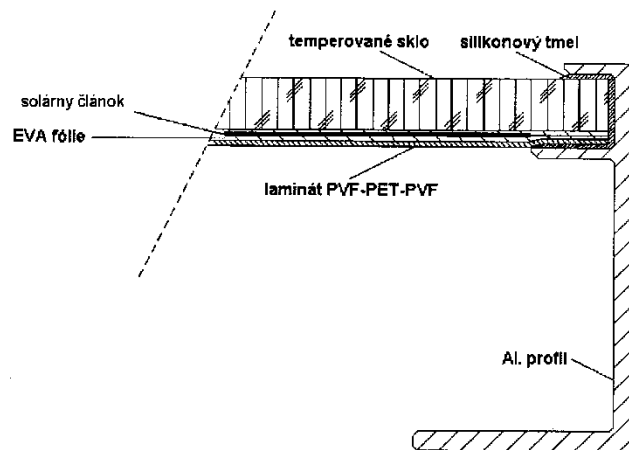
Účinnosť kvalitných PV článkov na báze monokryštalického kremíka sa dnes pohybuje okolo 20%. Účinnosť PV článkov na báze iných polovodičov (napr. GaAs, InP) je ešte vyššia, pohybuje sa na úrovni 25%. Preto sa takéto PV články používajú predovšetkým v kozmických aplikáciách, kde je potrebná maximálna účinnosť a odolnosť proti kozmickému žiareniu.

Tenkovrstvové články bývajú okrem kremíku napr. na báze CuInSe, CdTe či na báze heteropriechodov medzi rôznymi druhmi polovodičov. Takéto články sú relatívne lacné ale majú nižšiu účinnosť okolo 10% a navyše najväčším problémom býva stabilita parametrov. Je možné vyrobiť taký PV článok s prijateľnou účinnosťou až 15% ale účinnosť skoro klesá a po relatívne krátkej dobe je nižšia ako 10%. Preto sa použitie týchto článkov v solárnych PV systémoch príliš nerozšírilo. Dobré sa tenkovrstvové PV články uplatňujú v malých solárnych aplikáciách. Pri nízkych intenzitách osvetlenia pracujú lepšie. Tenkovrstvové články sa aplikujú napríklad ako strešná krytina s PV článkom na báze tenkých vrstiev amorfného kremíka. Podobný typ sa aplikuje aj v dopravných prostriedkoch. Do fotovoltaických panelov sa jednotlivé články skladajú v sériovoparalelnej kombinácii aby poskytovali žiadané napätie a výkon. Maximálny výkon závisí na veľkosti celkovej plochy PV článkov - na veľkosti panelov.

5.6 Konštrukcia fotovoltaického panelu

Najbežnejšia konštrukcia PV panelu je znázornená schematicky v reze na obrázku 31. Na prednej strane PV panelu je kalené sklo. Toto sklo je odolné proti nárazu. Na sklo sa ukladá plastová EVA fólia a na ňu prepojené PV články. Cez prepojené články sa znovu ukladá plastová EVA fólia a zadnú stenu tvorí spravidla PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Vyčerpá sa vzduch medzi vrstvami a panel sa zahreje nad teplotu tavenia EVA fólie. EVA (etylvinylacetát) sa rozteče a zaleje PV články v priestore medzi predným sklom a zadnou laminátovou stenou panelu. Nakoniec sa panely zatmelujú silikónovým tmelom do hliníkových profilov. Hotové PV panely sú tak utesnené proti vode a iným nečistotám. Životnosť kvalitných PV panelov na báze kryštalických polovodičov býva (20 - 30) rokov.

Nové obojstranné fotovoltaické (obr. 31) panely zložené z obojstranných PV článkov sú výhodnejšie ako doteraz používané panely štandardné, pritom ich cena sa príliš nelíši od ceny jednostranných panelov obr. 30. Rozdiel vo výrobných technológiách spočíva iba v tom, že na zadnej strane je použitý priehľadný laminát a zadné kontakty PV článkov nie sú celoplošné. Panel je optimalizovaný na dopad žiarenia z prednej strany ale účinnosť fotovoltaickej premeny pri dopade žiarenia na zadnú stranu je len o niečo nižšia.



Obrázok 30 Rez fotovoltaickým panelom, Zdroj: (Libra – Poulek, 2009)



Obrázok 31 Obojstranný fotovoltaický panel, Zdroj: (Libra – Poulek, 2009)

5.7 Fotovoltaické systémy

Hlavné časti fotovoltaických solárnych zariadení

Jednotlivé FV články sa integrujú do spoločnej konštrukcie. Konštrukcie slnečných modulov sú rôzne. Všeobecne je možné konštatovať, že panel musí zabezpečiť hermetické zapúzdenie slnečných článkov, dostatočnú mechanickú pevnosť a musí zabezpečiť jednoduchú inštaláciu a elektrické zapojenie. Nezanedbateľnou stránkou slnečných panelov je ich estetickosť.

- ✓ Solárne panely (FV moduly)

Solárne moduly (obr. 32) tvoria rad fotočlánkov zapojených do série, určujúcej napätie modulu, zatiaľ čo plocha a počet článkov zapojených paralelne určujú prúdové možnosti modulu.



Obrázok 32 Solárny modul zostavený z monokryštalických kremíkových FV článkov

- ✓ Solárne anténové systémy (solárne generátory)

Pozostávajú z viacerých štandardných solárnych modulov mechanicky a elektricky.

- ✓ Regulátory napätia

Derivačný regulátor, ktorý je osadený výlučne polovodičovými súčiastkami, je namontovaný vo vnútri plášťa zariadenia, prípadne na zadnej strane solárneho anténového systému. Hodnota napätia je nastaviteľná tak, aby vyhovovala nabíjaciemu napätiu, odporúčanému výrobcom. Regulátor je dimenzovaný tak, aby tlmil špičkový výkon solárneho anténového systému.

- ✓ Invertory - meniče jednosmerného prúdu na striedavý

Invertor je dôležitou súčasťou fotovoltaického anténového systému (generátora) z hľadiska funkčného a z hľadiska účinnosti pri nízkej záťaži. Pri jeho návrhu je potrebné zohľadniť skutočnosti vyplývajúce z charakteru napájaných spotrebičov z hľadiska napätia, prúdu, frekvencie a skreslenia signálu. V prípade systému spojeného so sieťou pribudne ešte synchronizácia výstupného napätia podľa veľkosti a fázy. Účinnosť invertora súvisí so zaťažovacím profilom. Relatívne malé požiadavky na výstupné napätia z invertora kladú rezistívne záťaže (odpory). Podstatne citlivejšie riešenie vyžadujú indukčné motory a indukčné záťaže. Nízka účinnosť invertora pri malej záťaži sa môže riešiť zapojením druhého, pomocného invertora pre malé záťaže. Takéto riešenie však nie je optimálne a prednosť má invertor pracujúci s vysokou účinnosťou v širokom rozsahu veľkosti zapojenej záťaže. Ďalšie vlastnosti požadované od invertora sú nasledovné: nominálne napätie pri meniacej sa záťaži, oddelenie jednosmernej a striedavej časti oddeľovacím transformátorom, schopnosť paralelne spolupracovať s verejnou sieťou, regulácia napätie podľa veľkosti aj fázy, prúdové obmedzenie.

V prípade použitia systému s akumulátormi, musí byť invertor riadený tak, aby žiadna časť výkonu, ktorý dodáva, nešla do verejnej siete. To sa realizuje sledovaním prúdu z invertora jeho porovnaním s prúdom do záťaže. Rozdiel sa reguluje na nulovú hodnotu. Význam tohto opatrenia je v zabránení vybíjania akumulátorov do siete.

✓ Akumulátory

Solárne anténové systémy sú konštruované tak, aby pracovali spoľahlivo pri zapojení s kvalitnými olovenými akumulátormi s 15% alebo nižším faktorom samovoľného vybíjania za rok a s ampérhodinovou kapacitou, zodpovedajúcou konštrukcii príslušného zariadenia.

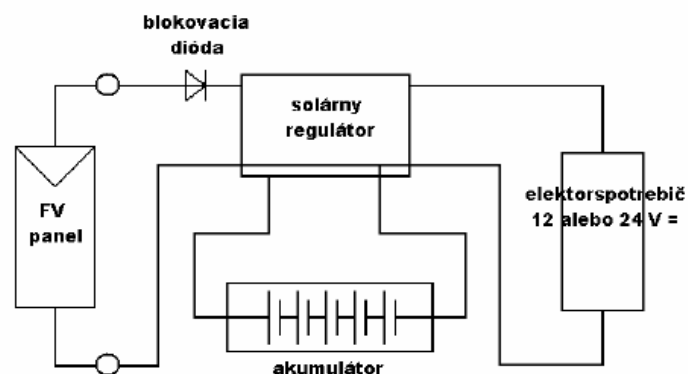
Počet modulov potrebných pre anténový systém sa určuje podľa záťažových podmienok a požiadaviek pre príslušné zariadenie s insoláciou stanovenou pre konkrétne miesto, kde bude systém nainštalovaný.

Pre prevádzku bez obsluhy sú solárne anténové systémy konštruované tak, aby vyhovovali priemernej záťaži pri ožiarení slnečným žiarením priemernej dennej intenzity. Pri voľbe zariadenia sa postupuje tak, aby sa predišlo aj náhodným vplyvom, ako je pokles výkonu v dôsledku znečistenia atmosféry, mimoriadne zmeny poveternostných podmienok a straty v akumulátore. Ráta sa až s 20% na straty denného výkonu na vyrovnanie koeficientu zhoršenia kvality fotovoltaiického panelu a nestability počasia. Straty spojené s akumulátorovým systémom sa pôvodne uvažovali ako straty napätia spojené s uskladnením energie do akumulátora. Táto strata predstavuje cca 15% a uvažuje sa s ňou pri konštrukcii modulu. Počet článkov musí byť dostatočný, aby poskytoval požadované napätie akumulátora. 5% strata pripadá na straty spojené s prenosom ampérhodín akumulátorovým systémom. Do úvahy sa musí brať samovoľné vybíjanie akumulátorového systému, čo predstavuje záťaž menej ako 0,042% akumuláčnej potreby batérie.

5.8 Zapojenie fotovoltaiických systémov

Ostrovne systémy (grid-off)

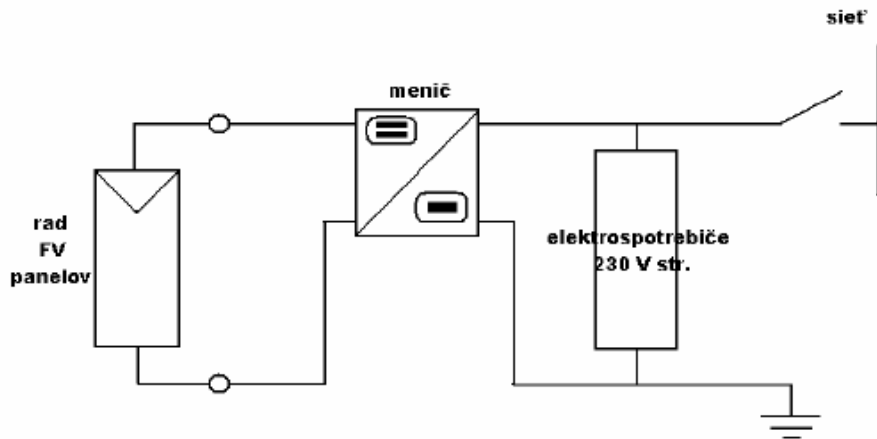
Súčasťou väčšiny z nich sú akumulátory na uskladnenie energie v čase, keď nesvieti slnko a kontrolný mechanizmus, chrániaci pred nadmerným nabíjaním a vybitím batérie, prípadne tiež menič napätia. Schéma ostrovného FV systému (grid-off) je znázornená na obr. 33.



Obrázok 33 Schéma ostrovného fotovoltaiického systému zapojeného (grid off), Zdroj: (Cviklovič, 2012)

Systémy pripojené na verejnú sieť(grid-on)

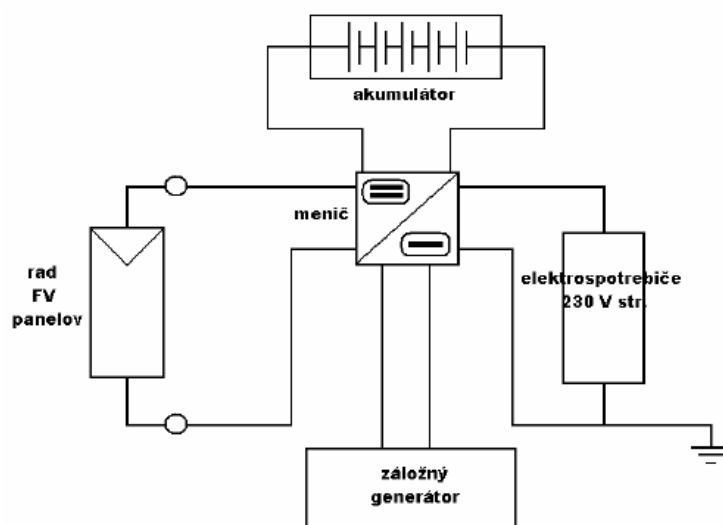
Používajú sa najmä v krajinách s plne rozvinutou elektrickou rozvodnou sieťou. Sú priamo prepojené na miestnu elektrickú sieť, čo im umožňuje vyrobenú elektrinu dodávať do siete alebo v prípade potreby ju z nej odoberať. Tieto systémy obsahujú menič napätia. Schéma zapojenia je znázornená na obr. 34.



Obrázok 34 Schéma fotovoltického systému pripojeného do verejnej elektrickej siete (grid on), Zdroj: (Cviklovič, 2012)

Hybridné systémy

Kombinujú solárne systémy s inými zdrojmi energie, ako je biomasa, veterné turbíny, dieslové generátory. Môžu byť pripojené na sieť alebo samostatné. Väčšinou sa využívajú pre rodinné domy alebo menšie usadlosti. Na obr. 35 je znázornený hybridný FV systém, zapojený grid-off.



Obrázok 35 Schéma hybridného fotovoltického systému v prevedení grid off, Zdroj: (Cviklovič, 2012)

5.9 Umiestňovanie FV systémov

Prioritou pri inštalácii malých FV systémov (inštalovaných na súkromných domoch, verejných budovách, obchodoch a pod.) je okrem funkčnosti, estetická hodnota a rozumná cena. Vývoj smeruje k materiálom, zakomponovateľným do striech a konštrukcie budov, kde majú plniť tiež funkciu architektonického prvku (obr. 36).



Obrázok 36 Inštalácia FV panelov na fasáde budovy



Obrázok 37 a) FV systém s pevnou konštrukciou b) Inštalácia FV elektrární disponujúcich natáčacími systémami – juh Španielska

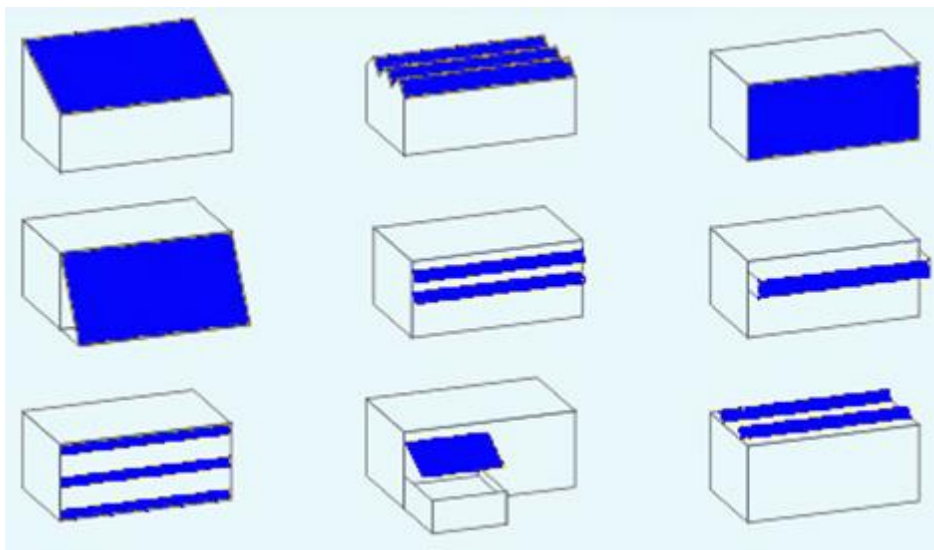
Zdroj: (Rybár – Tauš - Cehlár, 2012)

V prípade veľkých priemyselných inštalácií ako sú FV elektrárne pracujúce v elektrizačnej sústave sa FV panely inštalujú na nosné konštrukcie, ktoré sú buď pevné (obr. 37 a) alebo otáčavé – heliostatické (obr. 37 b). V porovnaní so statickou inštaláciou ($\alpha = 45^\circ$ a $\alpha = 0^\circ$) sa natáčaním dosiahne zvýšenie insolácie absorpčných plôch FV panelov o 47% a tým aj adekvátny nárast množstva vyrobenej energie o cca 40% (experimentálne overené) až 47% (teoreticky stanovené).

Takéto riešenie umožňuje zvýšenie miery využitia FV zariadenia a zhodnotenia vloženej investície, keďže z jednotkovej plochy FV panelu je možné získať cca 1,4 až 1,47 násobok množstva energie

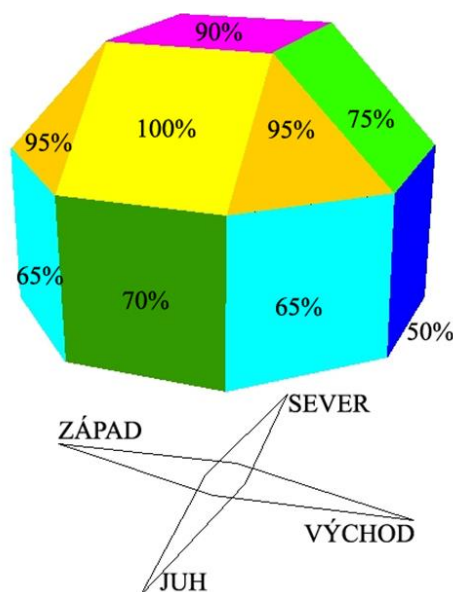
Typy systémov podľa umiestnenia resp. podľa spôsobu inštalácie

Dôležité je, aby strecha, alebo plocha na ktorú chceme osadiť fotovoltaické panely bola čo najviac osvetľovaná slnečnou energiou. V princípe musíme dokázať zachytiť čo najviac dopadajúcej slnečnej energie vďaka orientácii plochy a sklonu. Nižšie znázornený obrázok ilustruje percentuálnu závislosť efektívnosti zachytávania od sklonu panelov resp. záchytnej plochy (obr. 39).



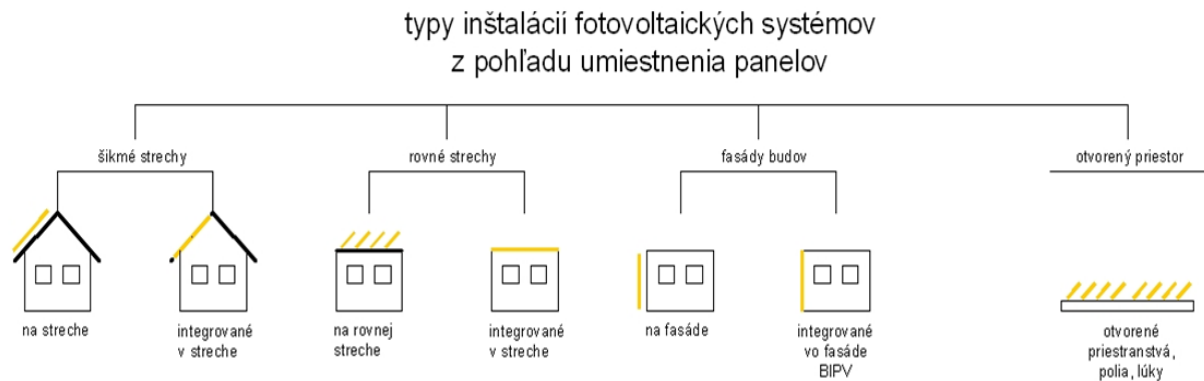
Obrázok 38 Typy systémov podľa umiestnenia resp. podľa spôsobu inštalácie

Zdroj: (<http://www.daia.sk/index.php>)



Obrázok 39 Percentuálna závislosť efektívnosti zachytávania slnečného žiarenia od sklonu FV panelov,

Zdroj: (<http://www.daia.sk/index.php>)



Obrázok 40 Typy inštalácií FV systémov podľa umiestnenia FV panelov

Zdroj: (<http://www.daia.sk/index.php>)

5.10 Komponenty fotovoltaického systému

Fotovoltaické články, ktoré sú použité vo FV paneloch spolu s prídavnými zariadeniami ako meniče (striedače) napätia, regulátory, skladovacie zariadenia, uchytenia, ale i konektory, prípojky, spojovací materiál tvoria spolu jeden FV systém. FV systém z hľadiska spôsobu používania, môžeme rozdeliť na : autonómny s priamou spotrebou, autonómny s akumuláciou (uskladnením) energie (grid-off), priame spojenie s elektrickou sieťou (grid-on), hybridný systém (grid-on + grid-off). FV pozostáva z týchto komponentov: fotovoltaický panel, regulátor nabíjania, napájacie zdroje, spôsoby uskladnenia energie, uchytenie a polohovacie zariadenia, spojovací materiál.

Fotovoltaický panel

Keďže problematike fotovoltaických panelov je venovaná kapitola 1.5 doplníme iba ďalšie dôležité fakty. FV panel je zložený väčšinou z 60 alebo 72 FV článkov. FV panel produkuje jednosmerný prúd (napätie), ktorý je následne uskladnený v akumulátore. V klasických prevedeniach (60 – 72) FV článkov sa napätie pohybuje okolo 30 V resp. 36 V.

Regulátor nabíjania

Tvorí spojovací prvok medzi FV modulom a akumulátorom – niekedy aj spotrebičom. Regulátor je zariadenie, ktoré zabezpečuje optimálny stav nabíjania (vybíjania) akumulátora. Regulátory bývajú štandardne vybavené viacerými funkciami ktoré plnia jednotlivé funkcie: ochrana proti prepólovaniu, prioritami napájania spotrebičov pri nedostatku energie, ochrana pred hĺbkovým vybitím akumulátora, môže obsahovať aj systém MPPT (kap. MPPT). V prípade, že akumulátor neodoberá žiadny prúd – je plne nabitý, regulátor nabíjania obmedzí prúd dodávaný do akumulátora na úroveň vlastných strát, čím je zabezpečené nulové nabíjanie akumulátora.

Napájacie zdroje

Väčšina elektrosпотреbičov potrebuje pre svoju funkčnosť špecifický prúd (napätie), preto je nutné zaradiť do systému zariadenie, ktoré vykoná požadovanú zmenu signálu (napätia, prúdu, frekvencie). Podľa zmeny signálu, rozdeľujeme zariadenia, ktoré tieto zmeny vykonávajú na:

- Usmerňovače – Zariadenia, ktoré menia striedavé napätie na napätie jednosmerné. Najlacnejším i najjednoduchším usmerňovačom je dióda. Základné prevedenia usmerňovačov: jednocestný, dvojcestný, mostíkový.
- Stabilizátory – Sú zariadenia, ktoré umožňujú stabilizáciu výstupného napätia alebo prúdu na požadovanú hodnotu. Okrem stabilizačných účinkov dochádza aj k znižovaniu hodnoty napätia (prúdu), čím sa stabilizátor chová čiastočne ako aj filter. Vyhotovenie sa môže realizovať pomocou diódy, zenerovej diódy, stabilizátory s pevnou hodnotou výstupného napätia, alebo stabilizátory s regulovanou hodnotou výstupného napätia atď. Transformátory – menia vstupné napätie na požadované výstupné napätie. Zmena napätia sa dosahuje pomerom závitov navinutých na sekundárnom a primárnom vinutí, čo vedie buď k zvýšeniu alebo k zníženiu napätia na výstupe.
- Meniče napätia (invertory) – Zariadenie, ktoré mení jednosmerné napätie na napätie striedavé, následne toto napätie transformuje a usmerňuje. Na výstupe meniča napätia je napätie, ktoré vyhovuje rôznym aplikáciám.

Pre zvýšenie výkonu celého FV systému sa do striedačov implementuje technológia MPPT, ktorá zabezpečuje optimálnu rovnováhu medzi napätím a prúdom, ktorý tečie z FV panelu do batérie a následne do invertoru. Vďaka tejto technológii, je možné výrazne zvýšiť výkon FV panelov. Najväčší význam v použití tejto technológie nastáva, keď na FV panel nedopadá intenzita pri ktorej, FV panel produkuje najväčší výkon.

Uskladnenie energie

Uskladniť energiu vyprodukovanú FV systémom sa dá rôznymi spôsobmi: mechanicky (zotrvačníky), pneumatically (vzduchové kompresory – stlačený vzduch), tepelne (vodné alebo olejové ohrievače – zásobníky), elektricky („super kondenzátory“), elektrochemicky (akumulátory, palivové články) (Ibrahim, Ilinca, Perron, 2006).

V nasledujúcej tabuľke je uvedené porovnanie jednotlivých parametrov uskladnenia energie pomocou rôznych foriem.

Bližšie sa budeme venovať spomínaným formám uskladnenia energie:

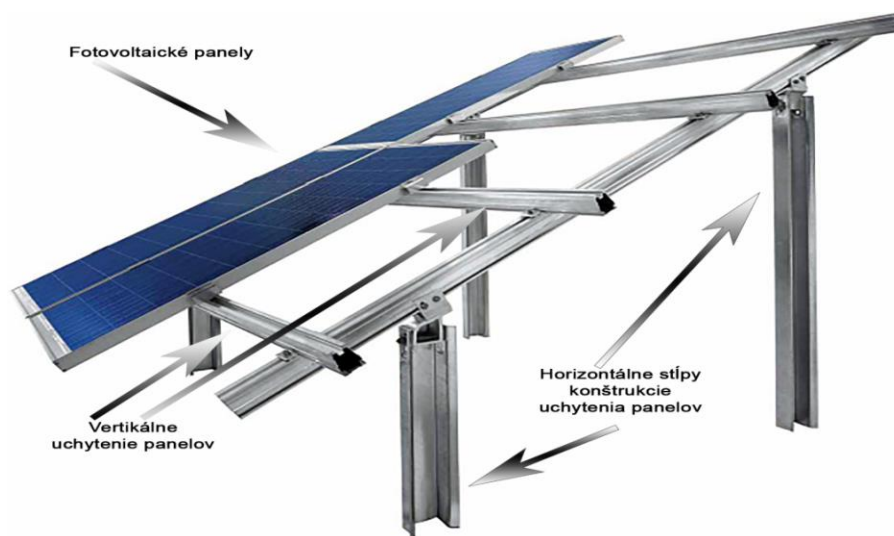
- **Akumulátory** – na skladovanie elektrickej energie sa používajú väčšinou sekundárne elektrochemické články, ktoré sú vzájomne prepojené a spolu tvoria akumulátor. Najznámejšie sekundárne články sú: olovené články (PbO_2), niklovo -kadmiové články (NiMh), niklovo - vodíkové články ($Ni(OH)_2$), lítium - polymérové články

(Li-ion, Li-pol). Na rozdiel od primárnych článkov, sekundárne články umožňujú opakované nabíjanie – využívajú vratný elektrochemický dej. Elektrochemický článok je sústava tvorená kladnou a zápornou elektródou a vhodným iónovo vodivým elektrolytom. Prúd v akumulátore môže prechádzať dvomi smermi: prirodzeným (od kladnej elektródy ku zápornej – vybíjanie), vynúteným (od zápornej elektródy ku kladnej – nabíjanie). Záporná elektróda je pri vybíjaní katódou a pri nabíjaní anódou. Aktívnu hmotu tvorí reaktant, ktorý sa pri vybíjaní článku oxiduje a uvoľňuje elektróny. Príkladom je zinková elektróda. Kladná elektróda je pri vybíjaní anódou a pri nabíjaní katódou. Aktívnu hmotu tvorí reaktant, ktorý pri vybíjaní článku prijíma elektróny. Má kladný elektródový potenciál. Príkladom je strieborná elektróda. Najdôležitejším znakom akumulátora je jeho kapacita. Kapacita akumulátora určuje, aké množstvo prúdu akumulátor dodá, kým príde k jeho vybitiu. Kapacita akumulátora sa uvádza v ampérhodinách (Ah).

- **Veľkokapacitné kondenzátory** – najstarší a najznámejší spôsob krátkodobého uskladnenia energie. Dokážu sa veľmi rýchlo nabíjať (vybíjať), disponujú veľkým počtom cyklov (nabitia, vybitia) – na rozdiel od akumulátorov, ktoré časom strácajú svoju kapacitu. Z hľadiska skladovania energie dosiahnuteľná kapacita je malá ($0,2 \text{ Wh.kg}^{-1}$). V posledných rokoch boli objavené „super kondenzátory“ – elektrochemické kondenzátory. Ich kapacita dosahuje 10 Wh.kg^{-1} . Ich použitie pre dlhodobé skladovanie je zatiaľ nerealizovateľné.

Uchytenie panelov

Uchytenie je možné niekoľkými spôsobmi. V prvom prípade nie je možné nastavenie polohy panela (natočenie, sklon). V druhom prípade ide o konštrukciu (obr. 41), na ktorú je pripevnený FV panel, konštrukcia má možnosť natáčania (natočenie, sklon). Polohovateľná konštrukcia poskytuje výrazné zvýšenie vyprodukovanej elektrickej energie.

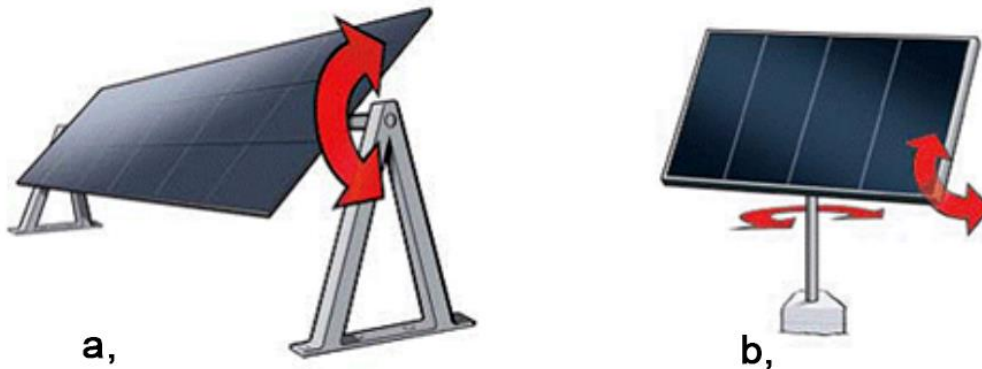


Obrázok 41 Popis konštrukcie uchytenia panelov, Zdroj: (Kušnir, Kapalo, 2011)

Nosnú konštrukciu je potrebné použiť v prípade: ak strecha je rovného charakteru, strecha nemá požadovaný sklon, FV panel sa nachádza vo voľnom priestranstve, alebo ho nie je možné (vhodné) inak uchytiť. Pri montáži panelov na voľnom priestranstve je potrebné vyhnúť sa prekryvu panelov tieňom. Na zamedzenie vzájomného clonenia medzi panelmi je potrebné dodržať dostatočný rozstup FV panelov. Kovové konštrukcie sú väčšinou vyrobené zo zliatin železa a zinku, alebo hliníka.

Sledovacie systémy (trackery)

Existujú jednoosové a dvojosové sledovacie systémy (obr. 42 a, b)). Jednoosové sledovacie systémy sú natáčané za Slnkom naklonením panela alebo sústavy FV panelov iba v rámci horizontálnej alebo iba v rámci vertikálnej osi. Dvojosové otočné systémy umožňujú sledovať Slnko naklonením a pootočením panelov tzn. súčasne dochádza k optimalizácii polohy FV panelov vzhľadom k Slnku v horizontálnom aj vertikálnom smere.



Obrázok 42 a) Jednoosový b) Dvojosový sledovací systém, Zdroj: (Kušnír, Kapalo, 2011)

5.11 Meranie dopadajúceho slnečného žiarenia

V meteorologických staniách sa najčastejšie meria len celkové žiarenie t.j. súčet priameho a difúzneho slnečného žiarenia. Používa sa k tomu pyranometer (obr. 43). Meranie je založené na porovnávaní teploty čierneho a bieleho povrchu po skleneným krytom a rozdiel teplôt meraný súborom termočlánkov je úmerný intenzite slnečného žiarenia. To, že slnečné žiarenie je premenené teplo zaručuje, že odozva nezávisí na vlnovej dĺžke žiarenia. Pyranometre s termočlánkom sú pomerne drahé, preto sa v poslednej dobe používajú pre meranie slnečného žiarenia pre technické účely pyranometre s čidlom na báze kremíkového fotovoltaiického článku. Pri týchto pyranometroch už nie je odozva prístroja nezávislá na vlnovej dĺžke a rovnaká pre celé spektrum slnečného žiarenia ako pri pyranometroch s termočlánkami. Na meranie intenzity dopadajúceho slnečného žiarenia na fotovoltaiický panel je tento prístroj úplne postačujúci.



Obrázok 43 Pyranometer CMP3, Zdroj: (Kipp & Zonen, 2016)

Solarimeter KIMO SL100

Na presné dimenzovanie solárnych systémov je potrebné poznať okrem klimatických pomerov lokality, kde má byť solárny systém inštalovaný aj hodnotu intenzity slnečného žiarenia. Intenzitu slnečného žiarenia v praxi meriame ako bolo spomenuté v predchádzajúcom texte, ale v solárnej technike sa používa aj označenie solarimeter. V prezentovanom príklade merania intenzity slnečného žiarenia v jednotlivých dňoch bol použitý solarimeter KIMO SL100 (obr. 44), ktorého popis je uvedený v tabuľke 10, 11 a nasledujúcom texte.



Obrázok 44 Solarimeter KIMO SL100, Zdroj: (kimocanada, 2014)

- Solarimeter KIMO SL100 je určený na meranie intenzity slnečného žiarenia t.j. energie emitovanej slnečným žiarením na jednotkovú plochu na určenom mieste v rámci zemského povrchu.
- Tok slnečného žiarenia predstavuje množstvo slnečného žiarenia, ktoré je prijaté jednotkou plochy za jednotku času a vyjadrené vo $W \cdot m^{-2}$.

- Expozícia slnečného žiarenia je celkové množstvo energie slnečného žiarenia prijaté jednotkou plochy počas trvania ožiarenia vyjadrené vo Wh.m^{-2} .

Tabuľka 10 Základné technické parametre snímača k solarimetru KIMO SL100,

Zdroj: (kimocanada, 2014)

Fyzikálna veličina resp. parameter zariadenia	Merací rozsah resp. charakteristická hodnota
Spektrálna odozva	(400 - 1100) nm
Menovitý kalibračný koeficient	100 mV pre 1000 W.m^{-2}
Kosínusová odozva	s korekciou do 80°
Teplotný koeficient	$+ 0.1 \text{ \%.}^\circ\text{C}^{-1}$
Prevádzková teplota	$(-30 - 60)^\circ\text{C}$
Závislosť na vlhkosti	100 % HR
Aktívny povrch	1 cm^2
Materiál	Polycrystallin silicon
Predná strana	Translucent PMMA
Hmotnosť článku	60 g
Rozmery článku	(30 x 32) mm

Prístroj SL100 je navrhnutý na meranie sumy priameho slnečného žiarenia a difúzneho slnečného žiarenia, ktoré označujeme termínom globálne žiarenie.

Solarimeter meria a zobrazuje v intervale 2x za sekundu intenzitu slnečného žiarenia zároveň ukladá maximálnu a minimálnu hodnotu.

Solarimeter KIMO SL100 je prístroj, ktorý spĺňa požiadavky a odporúčenia normy ISO – 1990: Solar energy – Specification and classification of Instruments for measuring solar radiation Hemispheric and direct.

Tabuľka 11 Hlavné technické údaje solarimetra KIMO SL100, Zdroj: (kimocanada, 2014)

Fyzikálna veličina resp. parameter zariadenia	Merací rozsah resp. charakteristická hodnota
Solárne žiarenie – merací rozsah	(1 - 1300) W.m ⁻²
Energetická expozícia	(1 - 500) kWh.m ⁻²
Presnosť výpočtových parametrov	lepšie než 0,5 W.m ⁻²
Presnosť zobrazeného parametra	1 W.m ⁻²
Doba odozvy (95%)	< 1s
Odchýlka linearity	< 3%
Vzorková frekvencia	2 Hz
Meracia kapacita	72 hodín
Prevádzková a skladovacia teplota	(-10 – 50) °C
Rozmery solárneho snímača	(120 x 58 x 34) mm
Hmotnosť prístroja s batériami bez snímača	135 g
Konektor	mini-DIN – kábel 1,25 m
Napájanie	3 LR3-AAA batérie
Spotreba energie	60 mW