

FAKULTNÍ ZÁKLADNÍ ŠKOLA OLOMOUČ, HÁLKOVA 4



ZÁVĚREČNÁ PRÁCE

Polovodiče a jejich využití a funkce v solární energetice

Olomouc, červen 2014

Jan STRNAD

Vedoucí práce:

Mgr. Zdeněk Titz

Obsah

1	Polovodiče	6
1.1	P a N doping	6
1.1.1	P doping.....	6
1.1.2	N doping	7
1.2	P-N přechod.....	7
1.3	P-N přechod a světlo.....	8
2	Solární články založené na krystalickém křemíku	9
2.1	Výroba krystalického křemíku	9
2.1.1	Výroba křemíku.....	9
2.1.2	Výroba polykrystalického křemíku	10
2.1.3	Výroba monokrystalického křemíku	10
2.1.4	Výroba substrátových disků	11
2.2	Konstrukce křemíkového solárního článku	11
2.2.1	Základy konstrukce křemíkového solárního článku.....	11
2.2.2	Další možnosti zvyšující efektivitu solárního článku.....	13
2.3	Solární panel	14
3	Tenkvrstvé solární články	16
3.1	Polovodiče III-V skupiny	16
3.2	Tenkvrstvé křemíkové články (fólie).....	18
3.2.1	Výroba tenkvrstevých křemíkových článků.....	18
3.3	CIGS (Copper Indium Gallium Selenide sulfide).....	19

3.4	Solární články založené na teluridu kadmnatém (CdTe)	20
3.5	Organické solární články	21
4	Součásti solárních systémů pro domácí užití.....	22
4.1	Solární systémy napojené do sítě.....	22
4.2	Solární systémy nezávislé na síti	22

Abstrakt

Tato práce je věnována z většiny standartním křemíkovým solárním článkům, jejich výrobě, vnitřní stavbě, funkci, různým alternativním možnostem vnitřní stavby těchto článků a tomu, jak jsou takové články skládány v solární panely. Dále jsou zde nějaké informace o tenkovrstvých solárních člancích, zvláště o vícevrstvých člancích založených na polovodičích III. a V. skupiny a o člancích založených na teluridu kadmnatém. Práce také obsahuje velmi zběžný popis celého obvodu sloužícího k výrobě elektrické energie.

Abstract

In this work are informations mostly about standart silicon solar cells, their function, inner configuration and manufacturing, some sentences are about alternative inner configurations of silicon solar cells and how solar modules are built from them. There are informations about thin film technologies, including III-V semiconductor technology and kadmium teluride based solar cells. There is a little list of „must have things“, which you need to build your own solar plant.

ÚVOD

V této práci se věnuji solární energetice a tomu, jak s ní souvisejí polovodiče, tedy hlavně vnitřní skladbě a funkci různých typů solárních článků. Zpočátku se také částečně věnuji tomu, co je to polovodič a těm vlastnostem polovodičů, které lze využít v oboru solární energetiky. Také zmiňuji postupný vývoj efektivity solárních článků a obvyklé využití nebo u některých novějších typů, které nyní pouze procházejí laboratorním testováním, možnosti využití v budoucnu. Práce obsahuje i porovnání různých typů solárních článků. Ve velmi malé míře se v práci zmiňuji o cenových podmínkách, době provozuschopnosti a o návratnosti solárních panelů. V práci jsou zmíněny i možnosti způsobu zásobování elektrickou energií, tedy možnost napojení nebo izolace od rozvodné sítě. Práce obsahuje i krátké pojednání o různých způsobech zabezpečení proti nepříznivým podmínkám a o závislosti výkonu solárního článku na teplotě.

Toto téma jsem si vybral, jelikož mé oblíbené vyučovací předměty jsou fyzika, chemie, matematika, přírodopis a zeměpis, to znamená, že touto prací skloubím dohromady tři ze svých oblíbených předmětů a to fyziku, matematiku a chemii. Také jsem na toto téma a na základy elektrotechniky úspěšně dokončil internetové kurzy a tak doufám, že si učivo těchto kurzů připomenou a třeba jej v nejlepším případě předám dál.

Chci dosáhnout toho, že nejen já, ale i někteří z mých spolužáků, kteří si budou ochotni tuto práci přečíst, dosáhnou částečného porozumění tématu a ověřit si své znalosti a schopnosti v tomto oboru, chci si na této práci také odzkoušet to, jak mají být práce tohoto typu psány, jelikož v dnešní době je nezbytné toto alespoň částečně zvládnout.

1 Polovodiče

Polovodič je takový materiál, jehož elektrická vodivost je vyšší než u izolantu, ale nižší než u kovu. Elektrony z valenčních vrstev se mohou u látek pohybovat ve dvou různých energetických pásech a to v pásu valenčním a vodivostním. Mezi nimi je tzv. pás zakázaný, ve kterém se elektrony nemohou pohybovat. Jedná se o energetickou hladinu, nikoliv prostorové umístění. To znamená, že ve valenčním pásu jsou elektrony s relativně nízkou energií, které „staticky“ obíhají stále stejné jádro (atomu) a ve vodivostním pásu jsou elektrony s relativně vyšší energií, které tvoří elektronový plyn mezi atomy, umožňující volný pohyb elektronů látkou (vodivost). V zakázaném pásu se elektrony nemohou vyskytovat, respektive jsou nestabilní, což znamená, že pokud dodáme elektronu energii přesahující rámec valenčního pásu, ale nedodáme dostatek energie, aby byl tento elektron ve vodivostním pásu, tato energie je vyzářena formou tepla nebo světla (využíváno u LED diod) a elektron se vrací zpět do valenčního pásu. V případě, že je dodaná energie mnohem vyšší, než je potřeba, aby se elektron dostal do vodivostního pásu, je část energie opět vyzářena a elektron se „usadí“ na spodní hranici vodivostního pásu.

U vodiče je velikost zakázaného pásu téměř zanedbatelná, $<0,1\text{eV}$ (elektronvoltage), u izolantu je velikost zakázaného pásu $<3\text{eV}$ (záleží na zdroji a podmínkách, toto je v podstatě je to hodnota určená pro zjednodušení člověkem, reálná je pouze velikost zakázaného pásu u konkrétní látky). U polovodiče je velikost zakázaného pásu $0,1\text{--}3\text{eV}$. Za předpokladu extrémních podmínek je každá látka vodičem, polovodič je (dle mé vysoce zjednodušené definice) látka, která není za normálních podmínek vodivá, ale lze ji do tohoto stavu velice snadno dostat. Za velmi vysokých teplot, tlaků, nebo napětí jsou vodivé i izolanty (např. solná tavenina), avšak toto je pro běžné použití neuskutečnitelné, vodivost těchto látek s teplotou roste (vyšší energie elektronů). Naopak vodič je látka vodivá téměř za jakýchkoliv podmínek, jeho vodivost s teplotou klesá (elektrony do sebe často narážejí a energie je vyzařována do okolí). Polovodič má téměř stejné vlastnosti jako izolant a za normálních podmínek se tak také chová, ale stačí pouze mírné zahřátí nebo přidání malého množství příměsí (v řádu setin procent-tzv. P-N doping) aby se tato látka stala vodivou, v případě P-N přechodu mezi P a N dopovaným polovodičem pouze jedním směrem.

1.1 P a N doping

1.1.1 P doping

P doping neboli pozitivní doping, jedná se o přidání velmi malého množství prvku, který má o jeden nebo více elektronů ve valenční vrstvě méně než polovodič (za předpokladu prvku jako polovodiče) do krystalu polovodiče. Toto vytvoří v polovodiči tzv. díry, což jsou vlastně místa, kde

chybí elektron v krystalu polovodiče, který je poté kladně nabit. Díry se mohou po krystalu polovodiče libovolně pohybovat, stejně jako elektrony v kovu. Většinou si však takto dopovaný polovodič uchová zbylé vlastnosti. Jistě existují i výjimky, které však bohužel nejsem schopen vyjmenovat. Zakázaný pás má stále jistou velikost, avšak mnohem menší než u nedopovaného polovodiče a větší než u kovu. Toto způsobuje úbytek napětí na polovodičových součástkách, jelikož je nutno část energie využít na překonání zakázaného pásu. Při zapojení krystalu do elektrického obvodu se díry pohybují opačným směrem než elektrony. Častým příkladem tohoto typu dopingu je dopování křemíku (4 valenční elektrony) bórem (3 valenční elektrony).



Obr. 1 Příklad difuze díry po krystalu křemíku (červeně) dopovaného bórem (zeleně). Elektrony modře a díra černě.

1.1.2 N doping

N doping neboli negativní doping, je přidání malého množství prvku s vyšším množstvím elektronů ve valenční vrstvě, než mají atomy polovodiče. Tímto jsou do krystalu polovodiče dodány volné elektrony, které se pohybují po krystalu a v případě zapojení do elektrického obvodu se chovají stejně jako valenční elektrony kovu. Krystal polovodiče je v tomto případě záporně nabit. Co se zakázaného pásu týče, je to stejné jako u P doping. Obvykle je dopován například křemík fosforem (5 valenčních elektronů).

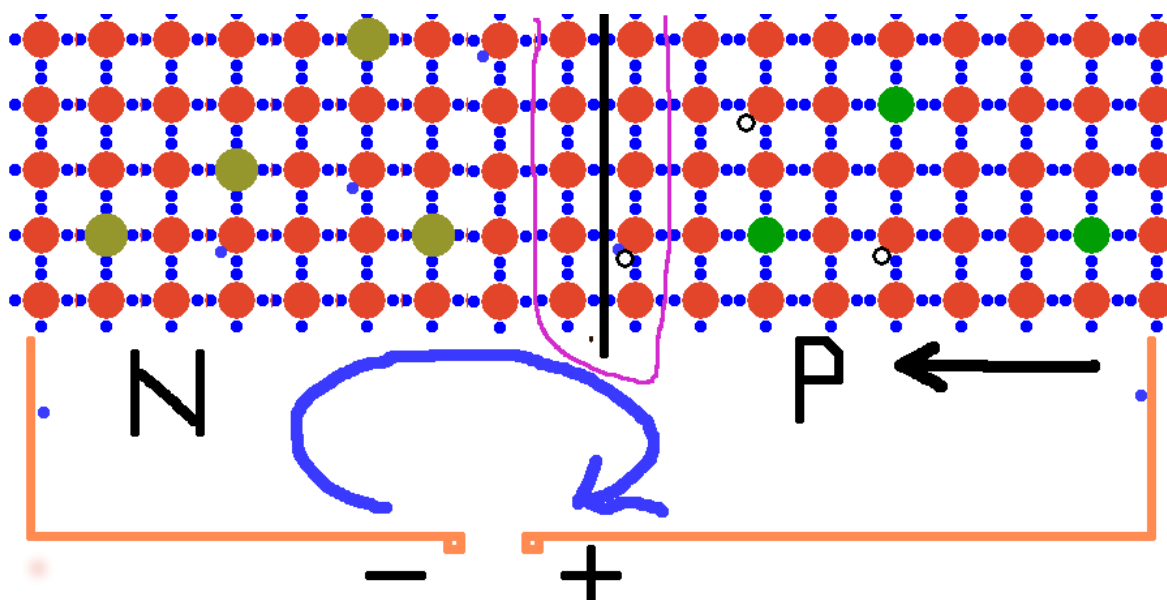


Obr. 2 Příklad difuze volného elektronu po krystalu křemíku dopovaného fosforem (světle hnědě)

1.2 P-N přechod

P-N přechod je pravděpodobně nejdůležitější věcí v dnešní elektrotechnice, avšak v této práci bohužel nemůže být rozebírán do podrobností. Jsou zde psány pouze věci, které je možno využít v solární energetice. Jedná se o rozhraní dvou krystalů většinou stejného polovodiče. Každý z těchto krystalů je jinak dopován (P a N doping). Toto umožňuje vodivost, ale pouze za

podmínky, že kladný pól baterie je napojen na P dopovaný krystal polovodiče. V opačném směru polovodič proud nevede. V případě správného zapojení k baterii se elektrony pohybují od záporného pólu baterie drátem k N dopovanému krystalu, a tím se pohybují dále až na rozhraní obou krystalů. Díry v P dopovaném krystalu se pohybují směrem od místa, kde je napojen drát od kladného pólu směrem k rozhraní. Na rozhraní elektrony obsadí díry, tím se stanou valenčními elektrony atomů v P dopovaném krystalu. Směrem od záporného pólu baterie postupuje stálý proud elektronů. V místě, kde je na P dopovaný krystal připojen drát od baterie, se část elektronů odděluje od krystalu a směřuje ke kladnému pólu baterie. Na jejich místech vznikají nové díry, pohybující se směrem k rozhraní P a N dopovaného krystalu. Polovodičem tedy prochází elektrický proud, ale pouze jedním směrem (dioda). Počty N dopantů (přidaných prvků do N dopovaného krystalu) jsou vždy několikanásobně vyšší než počty P dopantů.



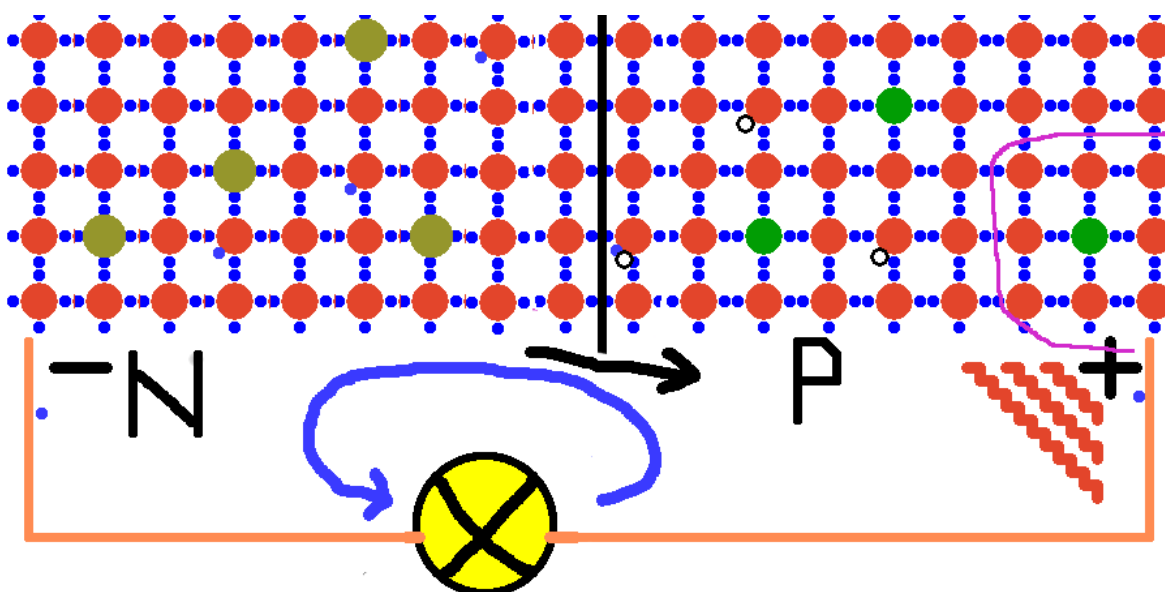
Obr. 3 P-N přechod pod proudem. Modrá šipka značí směr pohybu elektronů, černá směr pohybu děr. Ve fialově označené oblasti dochází k slučování volných elektronů a děr. Počet dopantů z důvodu názornosti přehněn.

1.3 P-N přechod a světlo

V případě, že na tyto P a N dopovaný krystaly svítí světlo, absorbované fotony dodají energii nutnou k překonání zakázaného pásu. Tím uvolní elektrony z valenční vrstvy, které se tak mohou volně pohybovat po krystalu polovodiče. Na takto uvolněném místě vzniká díra, která se taktéž může po krystalu polovodiče volně pohybovat. Většinou se to projeví prudkým nárůstem počtu přenašečů náboje (elektron nebo díra), které jsou v dané oblasti zastoupeny minimálně. Tvoří se

sice páry elektron-díra ale v případě N dopovaného krystalu, kde je dejme tomu 10^{15} volných elektronů a počet vzniklých párů je 10^3 , poznáme mnohem výrazněji nárůst počtu děr.

V případě, že P dopovaný krystal a N dopovaný krystal polovodiče spojíme drátem z opačné strany, než je P-N přechod, elektrony excitované (vypuzené z valenčního do vodivostního pásu za vzniku díry) v P dopované oblasti, které se difuzí dostanou do N dopované oblasti a následně do připojeného drátu, kterým projdou zpět do P dopované oblasti, kde vyplní jednu z děr. V případě dostatečně intenzivního světla se toto děje velmi často a ve vodiči vzniká elektrický proud. Takovýto zdroj elektrického proudu má kladný pól u P dopované oblasti.



Obr. 4 Nasvícený P-N přechod. Směr proudu vytvářeného je opačný než směr proudu propouštěného. Oblast slučování volných elektronů a děr je u místa napojení na vodič. Počet dopantů opět přehmán.

2 Solární články založené na krystalickém křemíku

Tyto solární články jsou nejčastějším typem solárních článků. Efektivita těchto solárních článků může dosáhnout až 20% slunečního záření přeměněného na elektrickou energii (v laboratorních podmínkách dosaženo 25%).

2.1 Výroba krystalického křemíku

2.1.1 Výroba křemíku

Křemík je vyráběn z oxidu křemičitého (křemen) v obloukové peci za teploty okolo 1900 stupňů celsia, do níž je přidán uhlík. Oxid křemičitý reaguje s křemíkem za vzniku oxidu

uhelnatého a křemíku. Čistota takto získaného křemíku je asi 98%. Více než polovina takto vyrobeného křemíku je používána na výrobu slitin hliníku používaných v motorech. Další část je využita v chemickém průmyslu. Pouze 1% z vyrobeného křemíku je použito na výrobu elektrotechniky. Dále je popsáno pouze zpracování pro elektrotechniku.

2.1.2 Výroba polykrystalického křemíku

2.1.2.1 Chemická depozice z plynné fáze

Tato metoda výroby probíhá tak, že do pece je vháněn křemíkový prach a sirovodík. Ty se slučují na plyn trichlorsilan (SiHCl_3). Následně je tento plyn zkapalněn a předestilován, aby bylo dosaženo co nejdokonalejšího odstranění nečistot. Následně je znovu vypařen a ve směsi s vodíkem je uvnitř nádoby, ve které je buď tyč nebo drát zahřát na teplotu mezi 850°C a 1050°C . Křemík začne krystalizovat na tyči nebo drátu za vzniku sirovodíku. Tento je použit znovu. Čistota takto získaného křemíku je 99.9999%, bohužel je však tato metoda vysoce energeticky náročná.

2.1.2.2 Výroba prutů polykrystalického křemíku

Pruty polykrystalického křemíku jsou vyráběny seškrabáním křemíku z tyče nebo drátu, následným natavením úlomků v nádobě o tvaru prutu ($70\text{cm} \times 70\text{cm} \times 25\text{cm}$) v inertní atmosféře a následným zchlazením, kdy v nádobě vznikne kus křemíku složený z mnoha malých krystalů.

2.1.3 Výroba monokrystalického křemíku

Monokrystalický křemík je na rozdíl od polykrystalického křemíku jen jeden krystal v celém prutu. Lze jej vyrábět pouze z vysoce čistého polykrystalického křemíku.

2.1.3.1 Czochralského metoda

Touto metodou se monokrystalický křemík vyrábí tak, že v nádobě s inertním plynem (argon) je umístěna nádoba vysoce čistého roztaveného křemíku o teplotě asi 1500°C . V této fázi jsou přidávány dopanty. Do nádoby je pomalu ponořen krystal křemíku o předem definované orientaci krystalové mřížky, který je přichycen na rotující tyči. Následně je tato tyč za rovnoměrné rotace vytahována, a tekutý křemík díky povrchovému napětí a odstředivé síle tvoří na tyči válec. Tento válec pomalu tuhne a atomy navazují na krystalickou mřížku. Takto jsou vyráběny jednolitě krystaly křemíku o různých průměrech (např. 20cm) a délce 2m, které jsou nazývané pruty. Tyto krystaly jsou vysoké čistoty a výroba není příliš energeticky náročná.

2.1.3.2 Metoda nataveného úseku

Při této metodě je použita jako výchozí materiál tyč z polykrystalického křemíku v nádobě s inertním plynem a plynnou sloučeninou dopantu (např. diboran B_2H_6). Na jednom konci je tato křemíková tyč natavena ohřevným kruhem a je do ní vsunut krystal křemíku s předem definovanou orientací krystalové mřížky. Následně se ohřevný kruh pohybuje vzhůru podél tyče, natavuje ji a v tuhnutí části tyče krystalizuje křemík navazující na vstupní krystal. Touto metodou lze vyrábět nejčistší možné krystaly křemíku, pokud nepočítáme dopanty.

2.1.4 Výroba substrátových disků

Substrátové disky jsou ploché desky krystalického křemíku (polykrystalického i monokrystalického). Z těchto disků se vyrábí solární články, procesory, diody a mnoho dalších součástí. Obvykle jsou řezány z křemíkových prutů drátovou řezačkou (neustále se otáčející drát). Toto však má tu nevýhodu, že je ztraceno mnoho materiálů a ten musí projít předchozími fázemi zpracování. Tloušťka substrátového disku se totiž pohybuje pro účely solární energetiky okolo 200 mikrometrů a pro účely výroby procesorů je ještě menší a tloušťka řezu je okolo 100 mikrometrů, ztráty jsou tedy 30% a více. Po řezu musí být substrátové disky leštěny.

2.1.4.1 Metoda křemíkového pásu

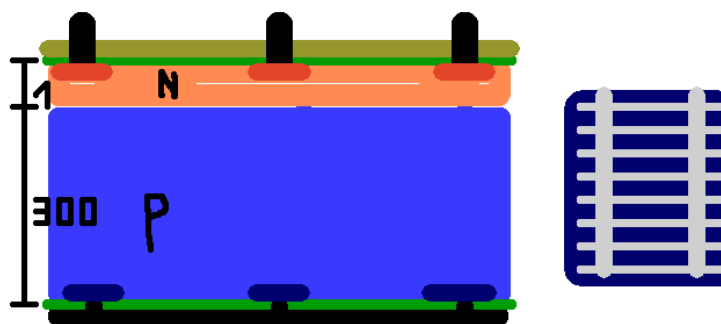
Tato metoda je nenákladná, avšak získaný křemík nedosahuje vysoké čistoty. Oproti Czochralského metodě a metodě nataveného úseku jsou vyráběny rovnou substrátové disky bez nutnosti řezání. Metoda je velice podobná Czochralského metodě. Do nádoby s křemíkovou taveninou je ponořena žáruvzdorná struna s tenkým páskem křemíku na konci (zbytek z minulé výroby). Následně je struna pomalu vytahována a tak vzniká velmi tenký křemíkový pás, krystalizující podle krystalu na struně. Pás je následně od struny odřezán a zbytek pásu na struně je použit jako základ pro příští pás.

2.2 Konstrukce křemíkového solárního článku

2.2.1 Základy konstrukce křemíkového solárního článku

Spodní vrstva křemíkového solárního článku je z kovu, často užívaný je hliník. Na vrstvě kovu je substrátový disk z P dopovaného křemíku tlustý 100-300 mikrometrů. Na něm je vrstva N dopovaného křemíku. Jelikož nejvíce fotonů je absorbováno těsně pod povrchem, musí být tloušťka N dopované vrstvy co nejmenší, ideální tloušťka je zhruba 1 mikrometr. Tato tloušťka by byla v případě výroby samostatného substrátového disku tak energeticky náročná na výrobu, že by

se výroba z ekonomického hlediska nevyplatila. Vrstva N dopovaného křemíku je vytvořena ohřátím substrátového disku v atmosféře obsahující sloučeniny dopantu. Atomy dopantu se teplotou oddělí od sloučeniny a difuzí začnou pomalu pronikat do substrátového disku, a tak tvořit N dopovanou vrstvu. Tloušťka této vrstvy závisí na teplotě a na čase, v němž je substrátový disk umístěn v atmosféře obsahující sloučeniny dopantu. Poté je z důvodu nedostatečné vodivosti polovodiče umístěna na povrch článku mřížka kovových kontaktů. Mřížka je obvykle dělána v relativně velké tloušťce, aby i při malé šíři kontaktů byl velký průřez vodiče, a tím pádem malý elektrický odpor. Na jednom solárním článku má mřížka obvykle dvě hlavní ramena, která jsou propojena vedlejšími rameny. Je zde také možnost ztrát výkonu z důvodu narušení krystalické struktury na povrchu článku, které může způsobit slučování volných elektronů s děrami. Toto je ošetřeno tenkou vrstvou izolačního materiálu na povrchu článku. Tento materiál je nevodivá sloučenina křemíku s jiným prvkem. Často je používán oxid křemičitý (sklo), který je na povrch umístěn tak, že je solární článek zahříván v atmosféře bohaté na kyslík, což způsobí oxidaci horní vrstvy solárního článku. Před touto operací musí být umístěna mřížka. Jako prevence ztrát je také silně dopována oblast N dopovaného křemíku pod kontakty. Ze zadní strany je také velkým problémem slučování volných elektronů s děrami, proto jsou užívány bodové kontakty a zbytek solárního článku je izolován od kovu tenkou vrstvou oxidu křemičitého. Také jsou tyto ztráty kompenzovány silným dopováním oblastí, kde dochází ke kontaktu kovu a polovodiče. Také dochází ke ztrátám v důsledku odrazu světla od povrchu solárního článku, proto je na povrchu ještě antireflexní vrstva nitridu křemičitého (Si_3N_4). Díky této vrstvě vypadají solární články namodrale.

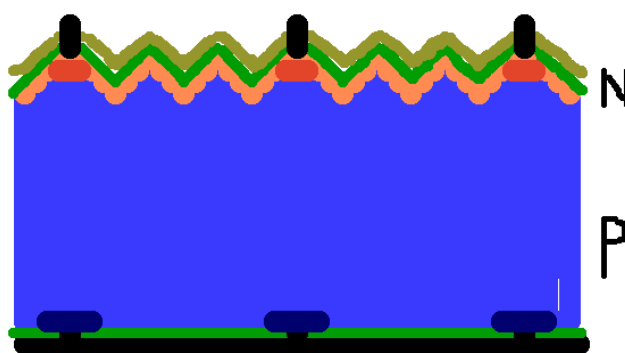


Obr. 5 Typický křemíkový solární článek. Černě je kov, zeleně oxid křemičitý a světle hnědě je nitrid křemičitý. Tmavší oblasti polovodiče jsou silněji dopované. Rozměry jsou v mikrometrech, oxid a nitrid křemičitý mají tloušťku zanedbatelnou. Vpravo typická mřížka kontaktů.

2.2.2 Další možnosti zvyšující efektivitu solárního článku

2.2.2.1 PERL (Passive Emmiter Rear Localy difused)

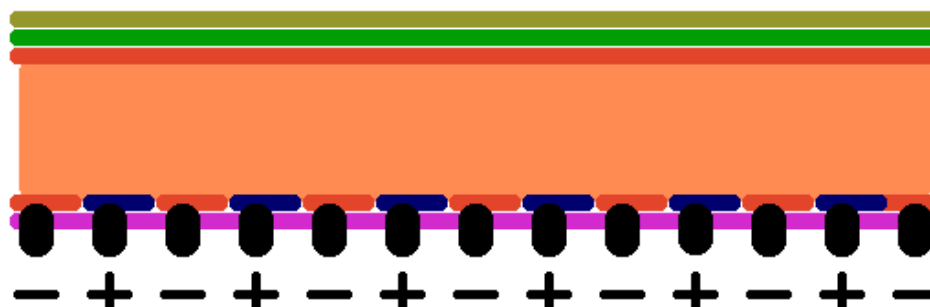
Dodatečně mohou být použita další opatření minimalizující ztráty. Jedním z těchto opatření je použít místo hladkého povrchu povrch, na kterém jsou mikroskopické otvory ve tvaru pyramidy (invertovaná pyramida), které minimalizují optické ztráty tím, že část odraženého světla je odražena pouze na jiné místo na povrchu článku, kde je většina tohoto světla absorbována. Další možností je místo nitridu křemičitého použít dvě antireflexní vrstvy, jednu z fluoridu hořečnatého (MgF_2) a druhou ze sulfidu zinečnatého (ZnS).



Obr. 6 Koncept PERL, vše jako v předchozím případě, dvojrvtstov antireflexní vrstvy není znázorněna (neznám pořadí).

2.2.2.2 IBC (Interdigitated Back Contact solar cell)

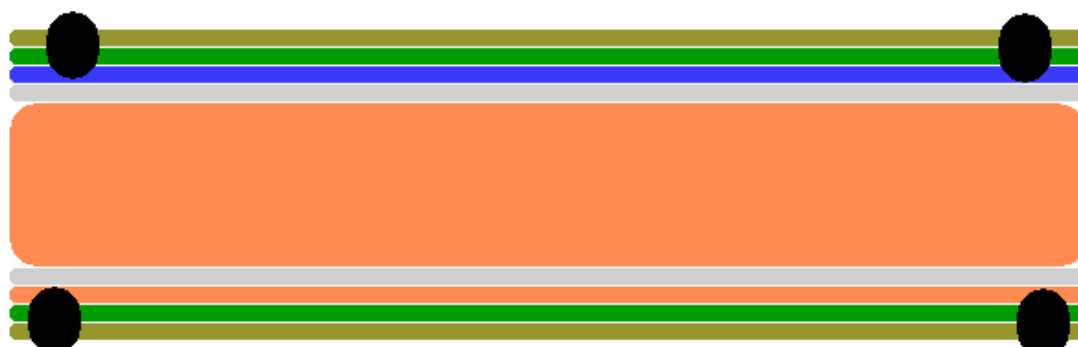
Toto je koncept založený na absenci stínění od vodivé mřížky, všechny kontakty jsou na zadní straně. Hlavní vrstvou je N dopovaný křemík, který lze vyrobit s menším množstvím nečistot než P dopovaný křemík, avšak je v něm horší rozložení přenašečů náboje. Na zadní straně se střídají kontakty napojené na silně P a N dopované oblasti. Plocha, na které se polovodič dotýká kovu, je udržována co nejmenší, jako prevence slučování děr s volnými elektrony. Dále efektivitu zvyšuje to, že může být mnohem větší průřez mřížky, neboť na zadní straně nestíní článek. Na zadní straně je zrcadlo, které odráží světlo, které prošlo článkem, tudíž umožňuje absorpci světla s větší vlnovou délkou. Navíc je u povrchu článku silně N dopovaná oblast zabraňující slučování přenašečů náboje.



Obr. 7 Koncept IBC, Barevné znázornění oblastí je stejné jako v předchozích případech, fialově je zrcadlo. Povšimněte si střídání polaritý zadní mřížky a absence přední mřížky. Invertované pyramidy pro jednoduchost neznázorněny.

2.2.2.3 HIT (Heterostructure with Intrinsic Thin film)

Tento koncept je založen na vložení velmi tenkých vrstev amorfního křemíku (není to krystal, jen náhodně rozmístěné atomy). Výhodou tohoto konceptu je velmi nízká pravděpodobnost sloučení volného elektronu a díry. Dosahuje také nejvyššího napětí na článek (standardizované rozměry laboratorního článku). Také je zde ušetřeno místo na kontaktní mřížku, z důvodu nepatrně vyššího napětí. Navíc je tento typ článku schopen absorbovat světlo přicházející z obou stran.

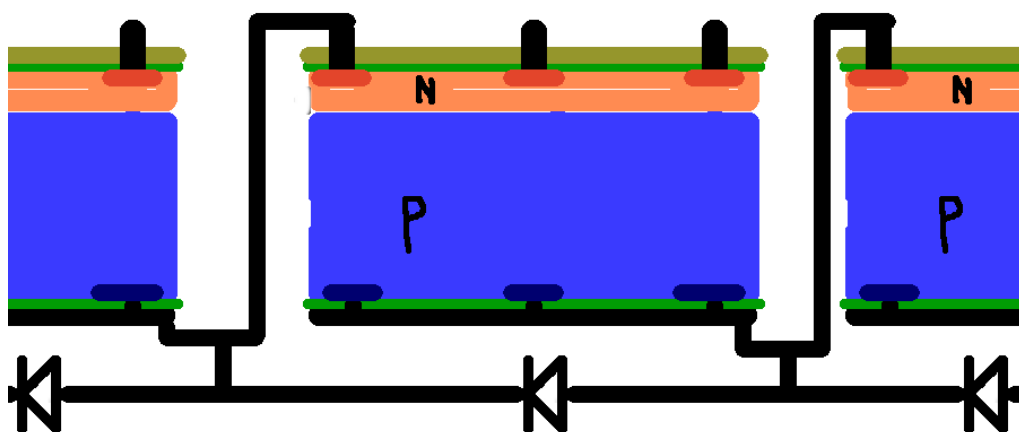


Obr. 8 Koncept HIT. Barevné znázornění oblastí je stejné jako předtím, šedě znázorněny vrstvy amorfního křemíku. Invertované pyramidy pro jednoduchost neznázorněny.

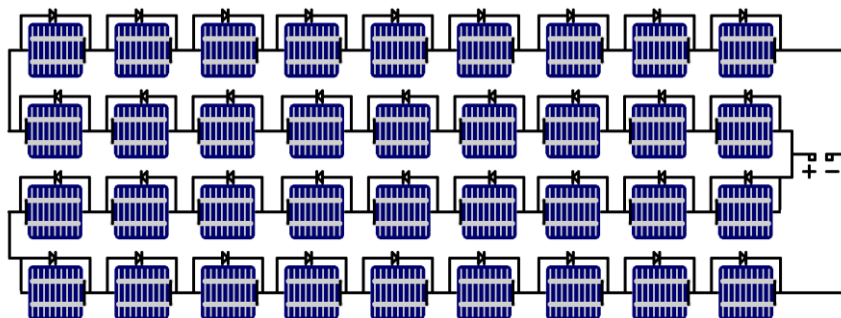
2.3 Solární panel

Solární panel je zařízením skládajícím se z mnoha solárních článků, pro všechny typy solárních článků zde platí stejná pravidla. Toto zařízení se skládá z rámu, do kterých jsou vloženy solární články. Typický solární panel o velikosti $1 \times 0,5\text{m}$ se skládá ze čtyř řad po devíti článcích. Pokud články zapojíme sériově, jejich napětí se sčítá a proud zůstává stejný. V případě, že je zapojíme paralelně, tak napětí zůstává stejné. Vzhledem k nízkému napětí jednoho solárního článku

(0,6-0,7V) je výhodnější sériové zapojení. Avšak to má tu nevýhodu, že pokud je panel částečně stíněn (strom, oblak), nesníží se pouze proud vyráběný stíněnými články, ale proud v celé soustavě a elektrická energie vyrobená nestíněnými články se v těch stíněných uvolňuje ve formě tepla. Stíněné články se následně silně přehřívají. Aby bylo možno se tohoto vyvarovat, je ke každému solárnímu článku paralelně zapojena dioda (viz. Obr 3). V případě, že je článek stíněn, projde proud z větší části diodou, což má sice také za následek ztráty, ale ne tak vysoké, jelikož pokles proudu je téměř minimální. Kdybychom měli sériově zapojených 5 článků o napětí 0,6V a proudu 2A, bylo by výsledné napětí 3V a proud 2A, tedy výkon 6W. Avšak pokud by jeden z těchto článků byl stíněn a jím produkovaný proud by byl 0,5A, proud produkovaný sestavou by byl pouze 0,5A, tedy výkon pouze 1,5W. Když budou ke každému článku paralelně zapojeny diody a jeden bude takto stíněn, bude sice určitý úbytek napětí na diodě (0,5V), celá soustava však bude dosahovat napětí 2,5V a proudu 2A, soustava tedy bude dosahovat výkonu 5W.



Obr. 9 Znárodnění sériového zapojení solárních článků s paralelně zapojenou diodou u každého článku.

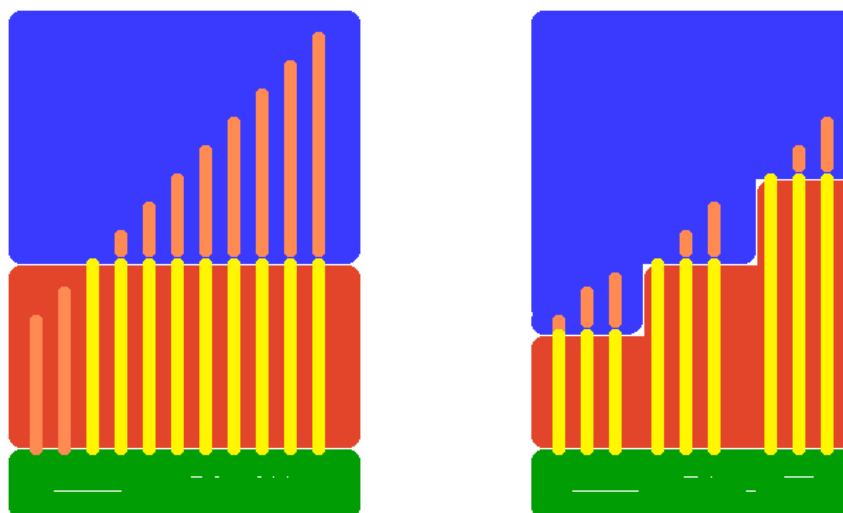


Obr. 2 Typické zapojení solárních článků v panelu.

3 Tenkovrstvé solární články

3.1 Polovodiče III-V skupiny

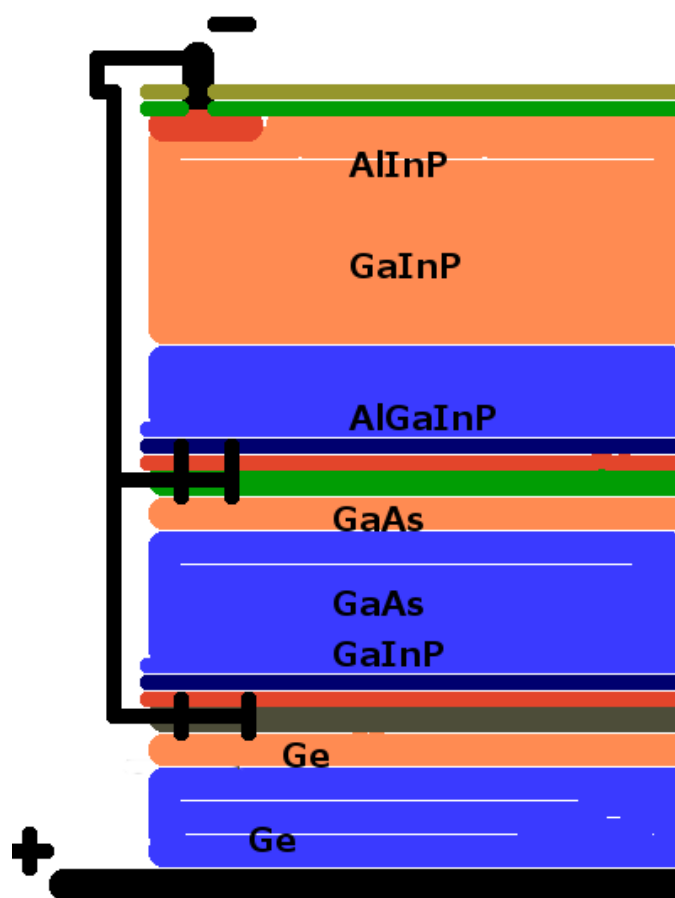
Tyto polovodiče jsou založeny na sloučeninách prvků s třemi elektrony ve valenční vrstvě, prvků s pěti elektrony ve valenční vrstvě a germania. Typickými sloučeninami jsou arsenid gallitý (GaAs), fosfid gallia (GaP), fosfid india (InP), arsenid india (InAs), arsenid indium-gallný (GaInAs) a fosfid indium-gallný (GaInP). Každá z těchto sloučenin má různou šířku zakázaného pásu. Články vyrobené z těchto sloučenin mají na rozdíl od křemíkových článků více P-N přechodů. Tím lze eliminovat to, že fotony s nízkou energií nejsou schopny dostat elektron z valenčního do vodivostního pásu a uvolňují svou energii formou tepla, nebo fotony s vysokou energií dodají nadbytek energie, která je opět vyzářena formou tepla. Také jsou tyto články asi desetkrát tenčí než běžné křemíkové články. Tyto články mohou dosáhnout efektivity okolo 40% (laboratorní rekord 44,1%, existuje sice Shockley-Queisser limit, ale ten platí pouze pro jednovrstvé články), ale jejich výroba je nákladná, proto se tyto články používají hlavně ve vesmíru, nebo je na ně sluneční záření koncentrováno zrcadly, v tomto případě však články musí být chlazeny.



Obr. 9 Rozdíl mezi standardním křemíkovým a třívrstevným III-V článkem. Zeleně znázorněn valenční pás, červeně zakázaný a modře vodivostní pás. Žlutě je znázorněna využitá a oranžově nevyužitá energie.

Tento typ článků je vyráběn z více vrstev různých polovodičů, kdy v každé vrstvě je jeden P-N přechod. Každý z těchto polovodičů má jinou velikost zakázaného pásu. V horní vrstvě je polovodič s malou velikostí zakázaného pásu, který zachytává krátké vlnové délky, pod ním je polovodič s větší velikostí zakázaného pásu zachytávající větší vlnové délky... Obvyklý počet

vrstev je tři, ale může jich být i více, ale to už je velmi malý rozdíl v efektivitě a velké zvýšení nákladů. Vrstvy takového článku musí být spojeny sériově. Mezi jednotlivými vrstvami jsou velmi tenké silně dopované mezivrstvy a pomocné mezivrstvy z různých materiálů, kterým se nebudu věnovat z důvodu přílišné složitosti.



Obr. 10 Průřez typickým III-V článkem. Barevné znázornění jako u křemíkových článků, tmavě hnědá vrstva je pomocná, materiál bohužel neznám. Text označuje použité druhy polovodičů. Spodní kladný pól je samostatný, každý záporný pól spojen s kladným pólem výše umístěné vrstvy (sériové zapojení)

3.2 Tenkovrstvé křemíkové články (fólie)

Tyto články jsou tenké křemíkové fólie, vyráběné z kombinace mikrokystalického (polykystalického s malými krystaly) křemíku a amorfního křemíku. Jejich výhodou je možnost nanesení na většinu povrchů, například na střešní krytinu. Na přibližně 10-15% křemíkových atomů je navázán jeden atom vodíku, což způsobuje zachycení některých volných elektronů. Dále bývá používána slitina křemíku s germaniem, která také obsahuje toto množství vodíku. Místo germania bývá používán také uhlík nebo kyslík, ale v mnohem menší koncentraci. Následně jsou tyto slitiny dopovány. Ideální poměr kystalických a amorfních slitin křemíku je 3:2, tedy zrnka krystalů oddělená malým množstvím amorfních slitin. Na použitých slitinách a poměru kystalické ku amorfní látce závisí velikost zakázaného pásu. Takovýto solární článek obsahuje mezi vrstvou P a N dopovaného materiálu ještě tenkou vrstvu nedopovaného amorfního křemíku (P-I-N přechod). Tyto články mohou být také vyráběny vícevrstvé.



Obr. 11 Tenkovrstvý článek z amorfního křemíku, místo kovových kontaktů je použit průhledný vodivý oxid.

3.2.1 Výroba tenkovrstvých křemíkových článků

Tyto články jsou laboratorně (průmyslová výroba je velmi podobná) vyráběny tak, že je vložena skleněná deska s vrstvou průhledného vodivého oxidu do podtlakové komory. Zde je nutná vysoká čistota. Následně je tato deska vystavena řídkému plazmatu (velmi horký plyn, elektrony odděleny od jader atomů) určitého materiálu. Po doteku s chladnější deskou se plazma na povrchu vysráží v pevnou látku. Tento postup je s jiným materiálem opakován, dokud nejsou nanесeny všechny vrstvy. Poté je do podtlakové komory s deskou, přikrytou z části plátem kovu, vloženo malé množství stříbra, které je vypařeno proudem elektronů a následně se toto stříbro vysráží na

nezakrytých místech, čímž vytvoří kontakty a zadní reflexní vrstvu. Místo stříbra lze použít levnější hliník, ale není pak dosaženo tak vysoké vodivosti a odrazivosti zadní reflexní vrstvy. Každá z těchto operací probíhá v jiné podtlakové komoře. V průběhu těchto prací jsou v určitých místech tyto vrstvy nařezávány laserem, čímž vzniká izolační vrstva plynu, oddělující jednotlivé články nanesené na stejné skleněné základové desky. Tímto způsobem jsou v laboratorních podmínkách vyráběny pevné panely. Efektivita článků je asi 10%, což znamená, že v průmyslovém měřítku se toto nevyplatí.

V průmyslovém měřítku jsou vyráběny ohebné fóliové panely, a to tak, že místo skleněné základové desky je použit nějaký levný kov, poté je ze zadní strany nanesena vrstva pružného ohebného materiálu. Následně je z přední strany odstraněn kov. To znamená, že horní vrstvu tvoří pouze průhledný vodivý oxid. K okrajům jednotlivých pásů se na průhledný vodivý oxid nanese tenký pásek stříbra nebo hliníku. Následně mohou být nanášeny ochranné vrstvy. Tyto fólie mají sice nízkou efektivitu a téměř nulovou mechanickou odolnost a jsou energeticky náročné na výrobu, ale jsou vysoce flexibilní a lze jimi pokrýt téměř cokoliv (střešní krytina, karoserie automobilu...)

3.3 CIGS (Copper Indium Gallium Selenide sulfide)

Tyto články jsou vyrobeny z polovodičů založených na selenidu indnato-měďnatém (CuInSe_2), sulfidu indnato-měďnatém (CuInS_2) a na selenidu gallnato-měďnatém (CuGaSe_2). Krystalická struktura těchto látek je podobná chalkopyritu (CuFeS_2). P doping těchto polovodičů je založen na absenci malého množství atomů mědi v krystalické mřížce. Tato prázdná místa zachycují volné elektrony, čímž umožňují dlouhodobou existenci děr. N dopovaná část je vyráběna z oxidu zinečnatého (ZnO), který je mimochodem jedním z průhledných vodivých oxidů, dopovaného hliníkem. Mezi nimi je ještě vrstva nedopovaného oxidu zinečnatého a vrstva sulfidu kademnatého (CdS). Spodní kontakt je tenká vrstva molybdeny nanesená na skle, jako vrchní kontakt funguje hliníkem dopovaná vrstva oxidu zinečnatého. Na ní mohou být umístěny ještě antireflexní vrstvy. Výkon solárního článku lze zvýšit 0.1% koncentrací sodíku v CIGS vrstvě. Výroba je velice podobná tenkovrstvým křemíkovým článkům, ale podrobnosti jsou bohužel firmami sřezeny jako výrobní tajemství. Efektivita se pohybuje okolo 20%.



Obr. 32 CIGS článek, sklo slouží pouze jako podklad pro nanášení dalších vrstev.

3.4 Solární články založené na teluridu kademnatém (CdTe)

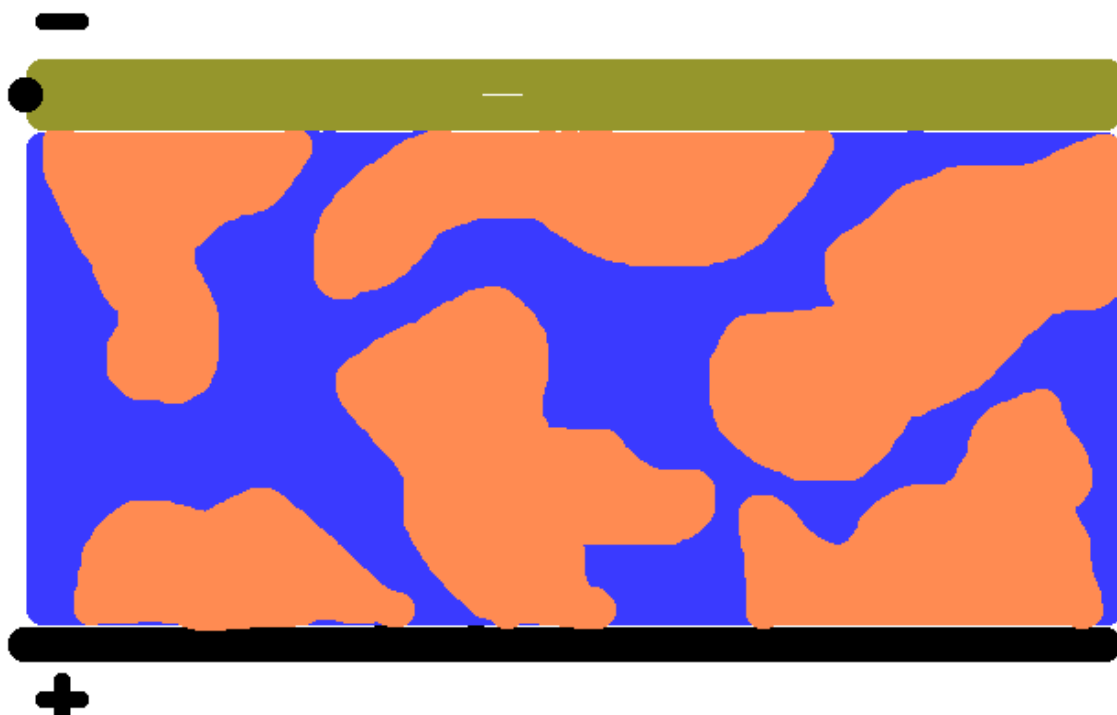
Hlavní složkou těchto článků je telurid kademnatý. N doping je prováděn nahrazením části atomů kadmia prvky se třemi elektrony ve valenční vrstvě (Al, Ga, In) nebo nahrazením části atomů teluru prvky se sedmi elektrony ve valenční vrstvě (F, Cl, Br, I). P doping je prováděn nahrazením části atomů kadmia prvky s jedním elektronem ve valenční vrstvě (Cu, Ag, Au) nebo nahrazením části atomů teluru prvky s pěti elektrony ve valenční vrstvě (N, P, As, Sb). Tyto články jsou vyráběny v podstatě stejně jako tenkovrstvé křemíkové články. Začíná se opět skleněnou deskou, na níž je nanesen oxid cínčitý (SnO₂) dopovaný kadmii, fungující jakožto svrchní kontakt a N dopovaná vrstva. Poté je nanášen sulfid kademnatý a po něm sulfid kademnatý, následně je nanesen zadní kontakt z kovu, což je ovšem velice problematické, neboť u tohoto kontaktu by bylo lepší, aby byl silněji dopován, avšak toto je u teluridu kademnatého velmi těžce realizovatelné. Dnes jsou na tento účel používány slitiny teluru a antimonu nebo molybden. Tyto solární články se svou efektivitou blíží 20%, jsou tedy v tomto ohledu velice podobné běžným křemíkovým solárním článkům, výroba je levnější, avšak jejich hlavní nevýhoda spočívá v obsahu silně toxického kadmia. V dnešní době jsou již vyvíjeny metody na recyklaci kadmia, takže v tomto typu solárních článků se skrývá docela velký potenciál.



Obr. 13 Solární článek založený na teluridu kademnatém.

3.5 Organické solární články

Tyto solární články se skládají z různých derivátů uhlovodíků, u kterých to, jaká skupina je navázána na uhlovodíkový zbytek, ovlivňuje, jestli je tento derivát uhlovodíku příjemcem nebo dárce elektronu, a tím pádem i to, jestli je materiál P nebo N dopovaný. Z důvodu špatné možnosti přenosu volných elektronů a děr z jednoho materiálu do druhého nejsou tyto solární články vrstvené jednoduše, ale P a N dopovaný polovodič jsou promíchány. Tento typ solárních článků je zatím pouze v experimentální fázi (údaj z konce roku 2013).



Obr. 14 Typický organický solární článek. Kovový kontakt černě, N dopovaný polovodič oranžově, P dopovaný polovodič modře, průhledný vodivý oxid světlezeleně.

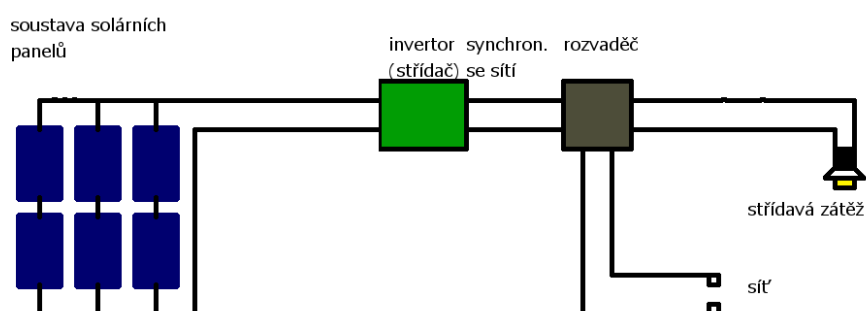
4 Součásti solárních systémů pro domácí užití

Tato kapitola práce je velmi povrchně věnována celkovému systému použitelnému v domácnostech, je to spíše jen seznam a popis součástí, jelikož v této oblasti nemám velké znalosti a navíc už je to mimo téma práce. Soustavu solárních panelů nebudu jako součást zmiňovat.

4.1 Solární systémy napojené do sítě

Součásti těchto systémů jsou:

- inverter: Převádí stejnosměrný proud na střídavý, musí být synchronizován se sítí. Je velmi nákladný. Velké energetické ztráty (10-15%)
- rozvaděč: Je v každém domě napojeném na síť.



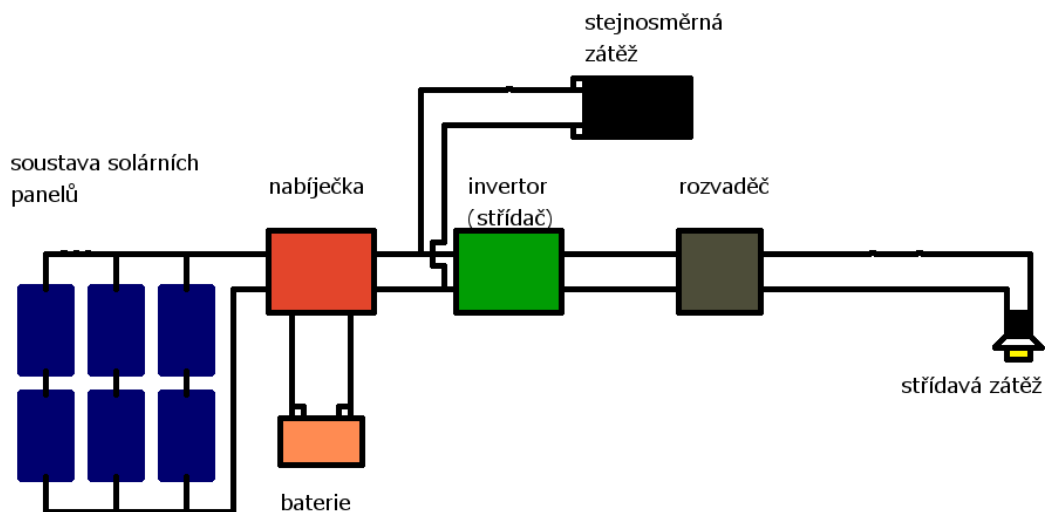
Obr. 45 Solární systém napojený na síť

4.2 Solární systémy nezávislé na síti

Součásti těchto systémů jsou:

- nabíječka: Podle momentálního výkonu solárního panelu, odběru a stavu baterie určuje, zda bude nabíjena baterie, využívána baterie nebo využíván solární článek.
- inverter: Převádí stejnosměrný proud na střídavý, nemusí být synchronizován se sítí, stačí, pokud vytváří střídavý proud přibližně na stejné frekvenci jako síť, aby mohly fungovat běžné domácí spotřebiče.

- baterie: Mohou být použité i olověné akumulátory, ale ty mají nízkou dobu funkčnosti kvůli paměťovému efektu (opakované částečné nabití a vybití ovlivňuje baterii), proto je lepší použít různé druhy lithiových baterií.



Obr. 56 Solární systém nezávislý na síti.

Závěr

Touto prací jsem dosáhl alespoň části cílů, které jsem si na počátku dal. Bylo to pro mne příjemné zopakování tohoto tématu, přestože jsem dle mého názoru pracoval na poslední chvíli. Také bych řekl, že jsem získal dostatek zkušeností s tvorbou takovýchto prací. To, jestli jsem zvládl svůj poslední cíl, dosáhnout toho, že si někteří z mých spolužáků tuto práci přečtou a dosáhnou alespoň částečného porozumění, ukáže až čas.

Závěr plynoucí z této práce je, že tento obor skýtá velmi mnoho možností, jelikož ze svých zdrojů jsem použil sice většinu témat, ale musel jsem je bohužel zjednodušit, přestože mé zdroje se tomuto tématu věnují pouze na základní úrovni. Co se budoucnosti tohoto oboru týče, myslím si, že se bude komplexnost oboru rozvíjet exponenciálně a tím i požadavky na znalosti, které bude muset člověk věnující se tomuto oboru naplno obsáhnout. Myslím si, že prudký rozvoj čeká hlavně oblast tenkovrstvých solárních článků, jelikož rozvoj v oblasti běžných křemíkových článků se již začíná blížit k hranicím svých možností. Největší rozvoj se dle mne bude týkat (až překonáme problémy se znečištěním) solárních článků založených na teluridu kadmnatém a hned po nich budou organické solární články, v dnešní době sice nákladné na výrobu, ale vzhledem k množství možných kombinací látek jistě skýtají dnes neznámé možnosti, které bychom měli co nejlépe využít. Další rozvoj se podle mne bude týkat nejspíše tenkovrstvých křemíkových článků, které ač zatím neefektivní jsou oproti všem ostatním typům solárních článků velmi flexibilní a téměř neuvěřitelně lehké. Prudkým rozvojem také dle mne projdou články založené na polovodičích třetí a páté skupiny, které jsou sice extrémně energeticky a finančně nákladné a zatím nemají žádnou návratnost při běžném použití, avšak i dnes nalézají díky své impozantní efektivitě blížící se 50% velké uplatnění ve vesmírných technologiích.

Ohledně přísunu dotací bych asi preferoval velké úpravy, jelikož 70% elektrické energie vyrobené těmito zařízeními na světě produkuje Německo, avšak 95% z toho jsou bohužel křemíkové články na úrodné orné půdě a celá Evropská unie se snaží tomuto přiblížit. Příklad bychom si měli brát nejspíše z USA, kde jsou solární elektrárny dotovány méně, tudíž se vyplatí pouze na ploše, kterou nelze jinak využít, jako jsou například střechy, nebo neúrodné oblasti.

Prohlašuji, že na celé práci jsem pracoval samostatně a uvedl jsem použitou literaturu.

V Olomouci, květen 2014

podpis

Literatura a zdroje

knihy:

Jméno autora. *Název publikace*. Místo vydání: Nakladatelství, rok vydání

ANANT AGARVAL A JEFREY LANG: *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*: Morgan Kaufman publishers, 2005

JAROSLAV HONZA A ALEŠ MAREČEK: *Chemie pro čtyřletá gymnázia 2.díl*: Nakladatelství Olomouc, 2005

webové stránky:

DELFT UNIVERSITY, online kurz ET3034TUx Solar Energy, [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <https://www.edx.org> (nutná registrace-toto je primární zdroj)

MIT, online kurz 6002x Circuits and electronics, [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <https://www.edx.org> (nutná registrace)

Všechna schémata jsou vyrobena autorem práce.