

7. SLUNEČNÍ ČLÁNKY

7.1. ÚVOD

Sluneční články nepatří mezi klasické elektrochemické zdroje, poněvadž energetické děje v nich probíhající mají výlučně fyzikální charakter (nedochází zde k žádným chemickým přeměnám zúčastněných látek). Jejich činnost je však založena na jistých vlastnostech polovodičů, což jsou látky se specifickými vlastnostmi plynoucími z charakteru valenční sféry jejich atomů. Z těchto důvodů je jim v této pomůcce věnována kratší závěrečná kapitola.

Sluneční články využívají při své činnosti fotoelektrického jevu, při němž se energie světelného záření dopadajícího na určité látky přímo mění na energii elektrickou. Ačkoli je zmíněný jev znám již téměř 150 let (jako první jej popsal francouzský fyzik Edmund Becquerel v roce 1839), byl fyzikálně částečně vysvětlen teprve v letech 1914–1916. Již předtím byly ovšem objeveny některé materiály, v nichž byl dobře pozorovatelný (selén, měď v kombinaci s oxidem mědi apod.). V roce 1923 obdržel Albert Einstein Nobelovu cenu za teorii kompletně osvětlující podstatu jevu, ale pokusy o jeho praktické využití stagnovaly zejména proto, že stávající technologie neumožňovaly přípravu chemicky dostatečně čistých vhodných materiálů. Až koncem čtyřicátých let byl výrobně zvládnut proces přípravy velmi čistého krystalického křemíku původně navržený polským fyzikem Czochralskim v roce 1918. Na tomto základě byl v roce 1954 v USA vyroben první moderní sluneční článek a již o čtyři roky později se tyto články začaly prosazovat i v tak náročných disciplínách, jako je kosmický výzkum. Některé z nich pracují až dodnes a potvrzují tak spolehlivost a životnost použitých technologií.

Abychom lépe porozuměli dějům probíhajícím ve slunečních člancích, shrňme si nejprve stručně dosavadní znalosti o polovodičích, což jsou materiály nejvhodnější pro jejich výrobu.

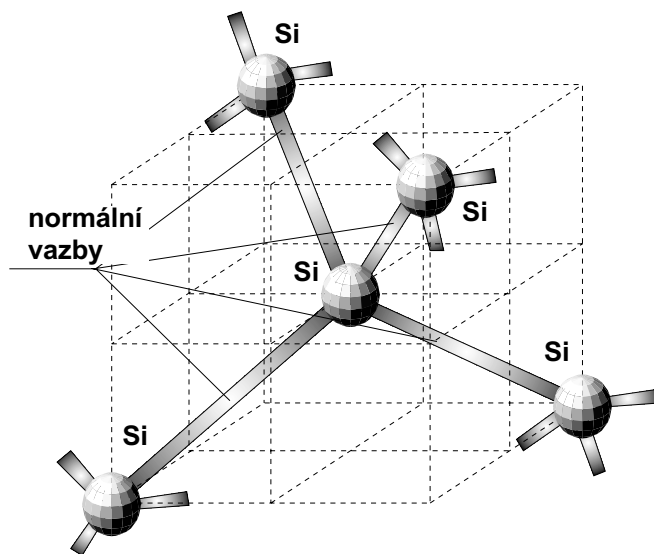
7.2. POLOVODIČE A JEJICH VLASTNOSTI

Jak již víme z kapitoly o chemické vazbě, v mnoha materiálech jsou elektrony ve valenční sféře sdíleny dvěma sousedními atomy (tyto atomy mohou být součástí např. molekuly nebo krystalové mřížky). Jestliže se některému z těchto elektronů dodá zvnějšku energie, elektron se z vazby může uvolnit. Pokud se mu pak znovu energie odebere, dostane se zpět do vazby (nemusí to být nutně ta předchozí, ale jiná; vždy však taková,

v níž elektron chybí). Ve vodičích existuje mnoho valenčních elektronů, které nejsou součástí žádné vazby a mohou se proto libovolně pohybovat v krystalové struktuře. V izolantech neexistují volné elektrony a k jejich případnému uvolnění je nutná velká energie. Polovodiče leží mezi těmito dvěma extrémy. Elektrony jsou sice zavazbeny, ale dodá-li se jim určitá (v zásadě malá) energie, z vazby se uvolní a mohou se volně pohybovat.

Tím, že se elektron uvolnil z vazby, vytváří zde kladnou "díru". Tato díra se může rovněž stěhovat; elektron sousedního atomu se např. může uvolnit kvantovým tunelovým jevem a zaujmout pozici chybějícího elektronu. Díra se tak může pohybovat po dráze, která je obecně zcela odlišná od dráhy, podél níž se pohybuje původně uvolněný elektron. Takto náhodně se může elektron i díra pohybovat uvnitř materiálu až do doby, kdy se znovu setkají a dojde k jejich opětovné rekombinaci. Pokud tedy máme homogenní polovodič (např. křemík), dodáním určité energie (např. světelné či tepelné) dosáhneme toho, že se vytvoří volné elektrony a díry, které se náhodně pohybují uvnitř jeho struktury.

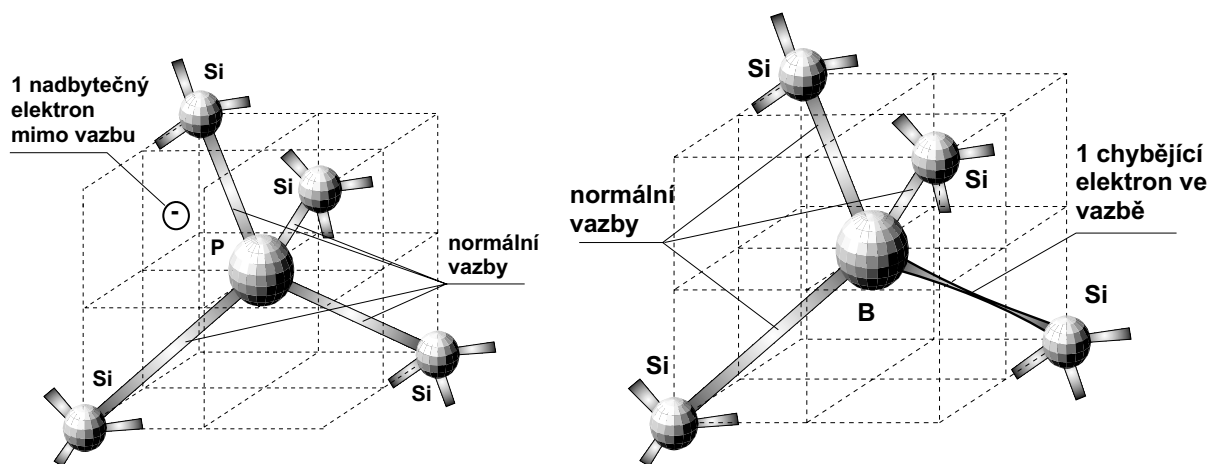
Krystal křemíku (jeho část je znázorněna na obr. 7.2.1) má zcela pravidelnou strukturu. Každý atom krystalu je vázán čtyřmi kovalentními vazbami k atomům sousedním.



Obr. 7.2.1: Struktura křemíkového krystalu

Předpokládejme nyní, že do této homogenní struktury vložíme atomy jiného prvku s jedním valenčním elektronem navíc (např. fosfor P). Tím se vytvoří materiál typu n s deficitem děr (obr. 7.2.2a). Podobně po přidání atomů jiného prvku, v jehož valenční sféře je o elektron méně (např. boru B), vzniká materiál typu p s deficitem elektronů (obr. 7.2.2b). Pozor, žádný z těchto materiálů samozřejmě není elektricky nabitý! Počet

elektronů ve valenční sféře každého atomu je stejný, jako počet protonů v jeho jádře.



Obr. 7.2.2 a, b: Struktura křemíku dopovaná a: fosforem, b: borem

Přiložme nyní materiál typu n a materiál typu p k sobě. Jak již bylo řečeno, v každém materiálu existují (zejména díky vnitřním tepelným efektům) putující elektrony a díry. Přes rozhraní pak přechází elektrony z materiálu typu n do materiálu p a díry právě naopak. Tím se v obou materiálech vytvoří malý prostorový náboj (v materiálu p záporný a v materiálu n kladný) a v jeho důsledku elektrické pole. Tento proces, nazývaný difúze, se zastaví díky vytvoření samotného náboje. Stejně náboje se odpuzují a hromadí se elektrony na jedné straně začnou proto odpuzovat další putující elektrony. Pokud má ovšem takový putující elektron dostatečně vysokou energii, aby přesto přes rozhraní přešel, ztratí obvykle její převážnou část, je donucen rekombinovat a stává se tak součástí již zmíněného prostorového náboje. Tento prostorový náboj je koncentrován díky přitažlivým elektrostatickým silám v blízkosti rozhraní. Rozhraní o šířce několika atomů se nazývá přechod.

7.3. POLOVODIČOVÁ DIODA

Zabývejme se nyní podrobněji jevy v uspořádání s rozhraním. Uvažujme nejprve elektron pohybující se uvnitř materiálu p . Tento elektron má určitou kinetickou energii (a tedy rychlost). Přiblíží-li se k přechodu, pocítí odpuzování od záporného náboje, jenž se vytvořil v blízkosti přechodu v materiálu p . Toto odpuzování jej zpomaluje, avšak pohybuje se dál k přechodu. Pokud má dostatek energie, aby prošel o něco více, než polovinu cesty prostorovým nábojem, začne být tímto nábojem odpuzován a současně přitahován kladným prostorovým nábojem na druhé straně přechodu v materiálu n . Tím se v tomto směru urychluje a překro-

čí přechod. Pokud nemá dostatek energie, záporný prostorový náboj ho odmrští zpět; takový elektron pak putuje dokud nerekombinuje s dírou. Vezměme si nyní jiný elektron pohybující se v materiálu n . Dostane-li se do blízkosti přechodu, začne být přitahován kladným prostorovým nábojem a urychluje se. Po projití poloviny cesty kladným nábojem pocítí ale odpuzování od záporného náboje v blízkosti přechodu v materiálu p a začne se vracet zpět (i díky vlivu kladného náboje). Elektron tedy může přejít přes přechod pouze v jednom směru, díra pak v opačném. Přechod tedy představuje jakousi energetickou bariéru, která umožňuje jeho průchod pouze jedním směrem. Tak jsme získali diodu, která má důležitou vlastnost. Přiložíme-li dva konce vodiče na obě strany přechodu, mohou jím jednosměrně procházet elektrony. Jedná se samozřejmě o zjednodušení. Kdybychom přiložili dostatečně vysoké protinapětí, mohli bychom snadno elektrony přinutit k pohybu opačným směrem.

Shrneme-li předchozí poznatky, vidíme, že difuzí elektronů a děr v důsledku vnitřních tepelných fluktuací vzniká na rozhraní materiálů p a n přechod. Příslušná excitace ovšem může pocházet i od jiné energie. Máme-li k dispozici materiál, v němž je energetický rozdíl mezi zavazbeným a volným elektronem přibližně roven energii fotonu viditelného světla ($\Delta W = h\nu$), lze hovořit o fotoelektrickém jevu. Volné elektrony a díry jsou zde vytvářeny dopadem světla (dopadlý foton předá svou energii vazebnímu elektronu a uvolní jej). Fotoelektrický článek je tedy vlastně velká plochá polovodičová dioda. Protékající proud je dán množstvím dopadajícího světla a napětí podstatně závisí na vlastnostech materiálu.

7.4. MATERIÁLY A KONSTRUKCE SLUNEČNÍCH ČLÁNKŮ

7.4.1. KRITERIA PRO VÝBĚR MATERIÁLŮ

Jak vyplynulo z předchozího odstavce, fotony slunečního záření dopadajícího na polovodič, které mají vyšší energii než je energie příslušné kovalentní vazby, mohou uvolnit z těchto vazeb elektrony a vyvolat tak elektrický proud. Pokud je energie dopadajícího záření vyšší, její nadbytečná část se přemění v teplo. Aby se slunečního záření co nejvíce využilo, musí být materiál pro sluneční článek vybrán tak, aby se energie potřebná k uvolnění jednoho elektronu z vazby pohybovala v rozmezí 1.0–1.6 eV. Tak se dosáhne toho, že pro záření z oblasti viditelného spektra o energiích od 0.5 eV (infračervené světlo) do 2.9 eV (ultrafialové světlo) nedojde k jeho nadměrnému ohřevu. Například pro krystalický křemík je minimální potřebná energie pro uvolnění elektronu z vazby 1.1

eV. Pro většinu dalších typů polovodičů je však tato energie ještě vyšší a je tudíž zřejmé, že část světla o nižších kmitočtech (až 55%) nemůže být prakticky vůbec využita. Fotony o nižších energiích materiálem buď projdou, nebo mu předají svou energii ve formě energie tepelné.

Z řady materiálů splňujících výše uvedené podmínky se pro výrobu slunečních článků v současné době využívají především

- křemík,
- polykrystalické tenké filmy obsahující sloučeniny selenu a teluru,
- *GaAs* a další příbuzné látky.

7.4.2. KŘEMÍK

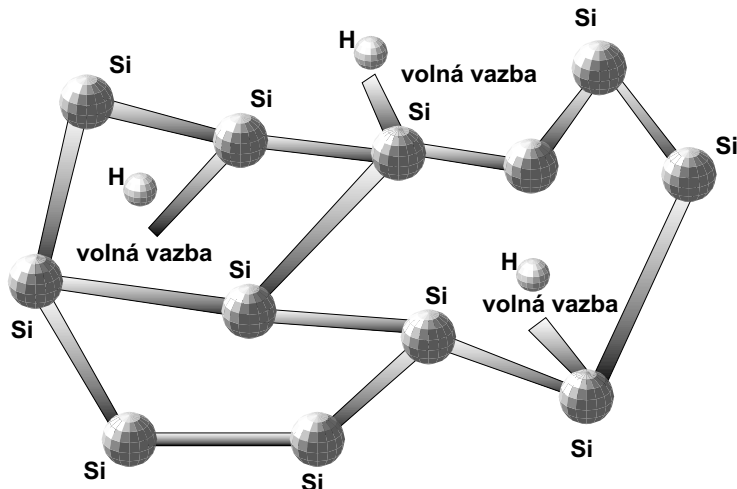
Křemík je doposud nejužívanější materiál pro výrobu článků. Hlavní výhodou je jeho široký výskyt, nevýhodou skutečnost, že musí být velmi čistý (99.9999%). Může být dodáván jako monokrystalický, polykrystalický a amorfní.

Monokrystal křemíku má homogenní molekulární strukturu, která je ideální pro průchod volných elektronů. Připravuje se z velmi čistého roztaveného křemíku, který se pomalu ochlazuje za přítomnosti malého monokrystalického jádra. Toto jádro začne postupně obrůstat, přičemž tuhnoucí vrstvy přejímají strukturu uvedeného jádra. Vzniklé ingoty, které mají tvar válečku, se potom řežou na tenké plátky (přitom vznikají ztráty až 20%). Tyto plátky se pak dopují a opatřují se antireflexní vrstvou a elektrickými kontakty.

Polykrystalický křemík je vyroben z velkého množství drobných zrn o rozměrech na úrovni setin mm. Rozhraní mezi těmito drobnými krystalky se ovšem vyznačují značnými nehomogenitami, kde nastává mnohem vyšší pravděpodobnost rekombinace procházejícího elektronu s dírou (tím je elektron ztracen pro vnější elektrický obvod). Příprava tohoto křemíku je však daleko levnější a je založena na rychlém ztuhnutí křemíkové taveniny. Výhodou je rovněž to, že zchlazený ingot má prizmatický tvar a nařezané plátky jsou proto čtvercové či obdélníkové.

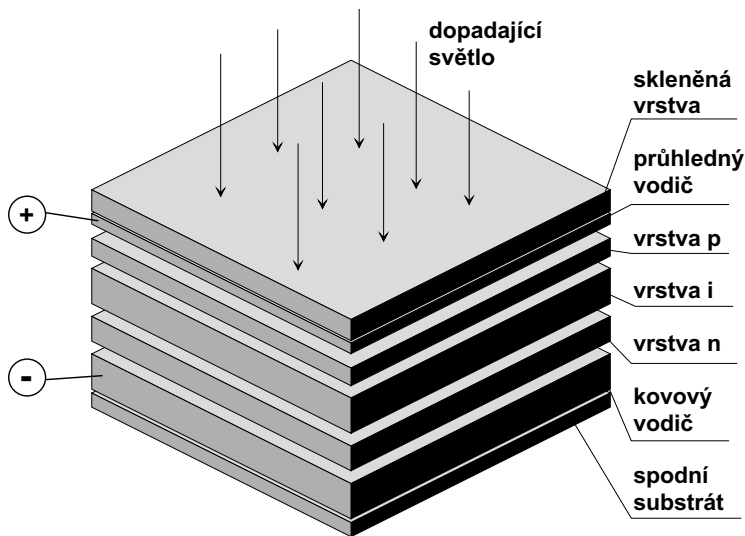
Amorfní křemík se vyznačuje absencí uspořádanosti jednotlivých atomů, neexistuje zde krystalová struktura a setkáváme se v něm s množstvím vazbových defektů. Využívá se od roku 1974 v člancích malého výkonu, např. pro náramkové hodinky a počítačky. Výhodou této modifikace je skutečnost, že absorbuje sluneční záření 40× účinněji než monokrystal *Si* a film z tohoto materiálu o tloušťce 1 μm absorbuje až 90% využitelného slunečního záření. Jeho výroba je levná (lze jej získávat při

nižších teplotách) a spotřeba vůči jiným modifikacím velmi malá. Nevýhodou jsou zmíněné vazbové defekty (obr. 7.4.1), v jejichž blízkosti jsou volné elektrony velmi náchylné k rekombinacím s dírami. Z těchto důvodů se křemíkový film dopuje vodíkem (příslušný proces se nazývá hydrogenace), jehož atomy chemicky reagují s volnými vazbami a zaplňují je. Světelné záření však postupně vodík z vazeb uvolňuje, ten v plynné formě uniká do okolního prostoru a článek se pomalu znehodnocuje.



Obr. 7.4.1: Hydrogenace amorfního křemíku

Konstrukce článku využívajícího amorfni křemík je znázorněna na obr. 7.4.2.



Obr. 7.4.2: Konstrukce slunečního článku z amorfního křemíku

Článek sestává z horní p-vrstvy o tloušťce $0.008 \mu\text{m}$, $0.5\text{--}1 \mu\text{m}$ silné vnitřní vrstvy (i-vrstvy) a spodní n-vrstvy o tloušťce $0.02 \mu\text{m}$. Horní vrstva je průhledná (sklo), aby byl zajištěn přístup záření k p-vrstvě. Elektrony se uvolňují především ve střední i-vrstvě a jsou urychlovány

elektrickým polem vytvořeným mezi vrstvami p a n.

7.4.3. POLYKRISTALICKÉ TENKÉ FILMY

Polykrystalické látky (jak již bylo řečeno v případě křemíku) jsou výhodné co do nízké spotřeby materiálu a snadno se zpracovávají. Nejlépe se osvědčily následující materiály:

- diselenid india a mědi $CuInSe_2$ (někdy s přísadou Ga) se vyznačuje velmi vysokou pohltivostí záření (až 99% v horní vrstvách o tloušťce 1 μm) a vazební energií kolem 1 eV,
- tellurid kadmia $CdTe$, který má rovněž velmi dobré absorpční schopnosti, vazební energií 1.44 eV a často obsahuje přísady jako Zn , Hg apod.; nevýhodou je toxicita Cd i Hg .

Články založené na těchto materiálech sestávají ze tří aktivních vrstev (n, i a p) a konstrukce článku s $CdTe$ je podobná (až na záměnu vrstev n a p) článku na obr. 7.4.2. Povrch článku je opatřen skleněnou vrstvou. Pod ní je velmi tenká antireflexní vrstva z SnO_2 , která současně představuje elektrický sběrač. Následuje vrstva n ze sirníku kadmia CdS , vrstva i z $CdTe$ a vrstva p z $ZnTe$. Pod ní je druhý elektrický kontakt a spodní substrát. Dopovaný $CdTe$ je pro p-vrstvu nevhodný, neboť se vyznačuje vysokou elektrickou rezistivitou a tudíž značnými ztrátami.

7.4.4. ČLÁNKY NA BÁZI $GaAs$

Galiumarsenid $GaAs$ je směs galia a arsenu. Galium je vedlejší produkt při získávání různých kovů (zejména hliníku a zinku) a je vzácnější než zlato. Arsen sice vzácný není, je však jedovatý. Galiumarsenid je vhodný především pro články s více přechody a má následující vlastnosti:

- energie kovalentní vazby je 1.43 eV,
- silně pohlcuje světelné záření, takže tloušťka vrstvy stačí jen několik μm (u monokrystalického křemíku 100 μm),
- na rozdíl od křemíku není příliš citlivý na teplotní změny,
- slitiny $GaAs$ s dalšími prvky, jako např. Al , P , Sb nebo In mají charakteristiky doplňující parametry čistého $GaAs$ a umožňují značnou pružnost při výrobě článku,
- je vysoce odolný vůči poškození zářením (což je velmi výhodné pro kosmické aplikace).

Články na bázi $GaAs$ obecně mohou sestávat z více vrstev s lehce odlišnými vlastnostmi, což umožňuje poměrně přesně řídit četnost vzniku volných elektronů a děr (v případě křemíku lze téhož účinku dosáhnout

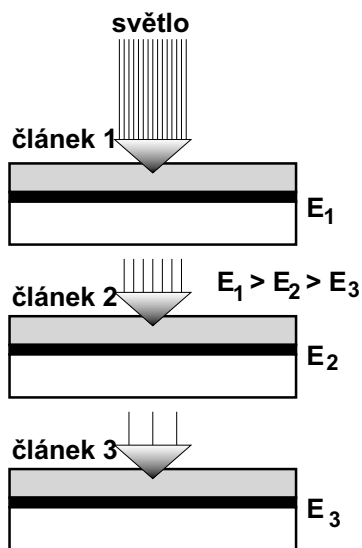
různým stupněm dopování, avšak za cenu vyšších nákladů) a tím zvyšovat jejich účinnost.

Existuje řada dalších technologií, které ovšem zatím zůstávají na laboratorní úrovni (drahé vstupní materiály). Obecně výroba všech tenkých filmů je doprovázena toxickými plyny, které při ní vznikají a navíc jsou značně reaktivní (toxické látky vznikají i při plátkových technologiích, kde se však jedná vesměs o kapaliny; ty ovšem nejsou tak nebezpečné, poněvadž neunikají do ovzduší).

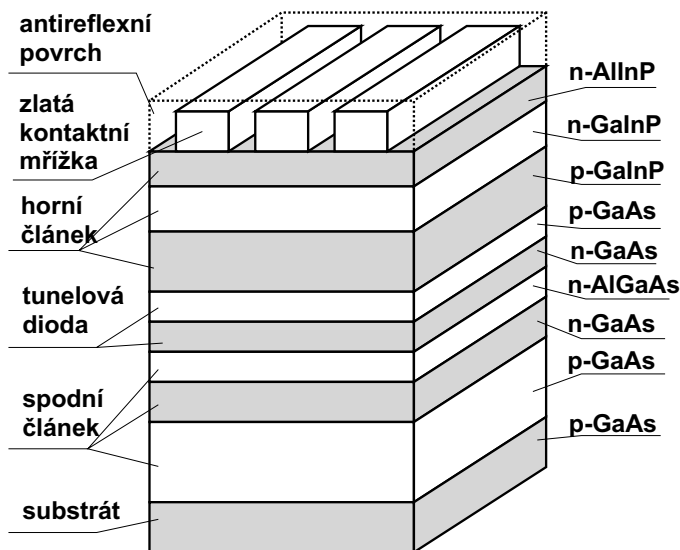
7.4.5. ČLÁNKY S VÍCE PŘECHODY

Ve slunečním článku s jedním přechodem se ze slunečního záření uplatní jen ty fotony, jejichž energie je rovna nebo vyšší než energie potřebná k uvolnění elektronu z vazby. Fotony s nižší energií zde nemohou být využity.

Nejsnazší z cest, jak obejít toto omezení, je použít dvou nebo více článků z různých materiálů, zapojit je do série a vytvořit tak článek s více přechody (říká se mu rovněž článek kaskádní). Funkce článku je patrná z obr. 7.4.3; v sérii je zapojeno několik článků v sestupné řadě co do energie vazby. Horní článek pohlcuje fotony s nejvyšší energií a propouští fotony s energií nižší, které jsou pohlcovány v následujících dílčích článcích. Účinnost energetické přeměny lze tímto způsobem dosti podstatně zvýšit.



Obr. 7.4.3: Princip vícepřechodového článku

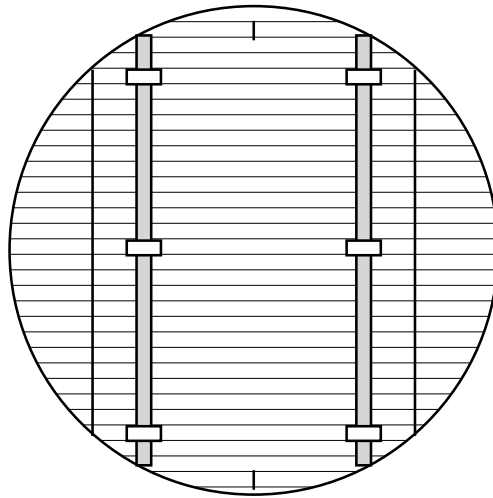


Obr. 7.4.4: Schéma vícepřechodového článku na bázi Ga

Mnohé ze současných vícepřechodových článků jsou založeny právě na látkách obsahujících galium. Tyto články dosahují při koncentrovaném slunečním světle účinnosti až 35%. Dále se v těchto člancích uplatňuje amorfní křemík a $CuInSe_2$. Schéma vícepřechodového článku na bázi Ga je znázorněno na obr. 7.4.4.

7.5. ELEKTRICKÉ KONTAKTY

Velmi důležitou součástí každého slunečního článku jsou elektrické kontakty, představující spoj mezi aktivním polovodičem a vnějším obvodem. Zadní kontakt článku (spodní vrstvy vzdálenější od zdroje záření) se běžně vyrábí ve formě tenké vrstvy hliníku či molybdenu. V případě předního kontaktu (na horní vrstvě vystavené slunci) je situace složitější. Je-li článek vystaven slunečnímu záření, polovodičem procházejí elektrony přibližně rovnoměrně kolmo k povrchové ploše. Aby mohly přejít do vnějšího obvodu, musí být kontakt rozprostřen po celé této ploše, což lze realizovat kovovou mřížkou. Ta však musí být dostatečně jemná, aby nezpůsobovala nadměrné stínění a nesnižovala tak účinnost článku. Elektrický kontakt na povrchu běžné horní destičky typického článku má tvar podle obr. 7.5.1.



Obr. 7.5.1: Běžný tvar mřížkového kontaktu

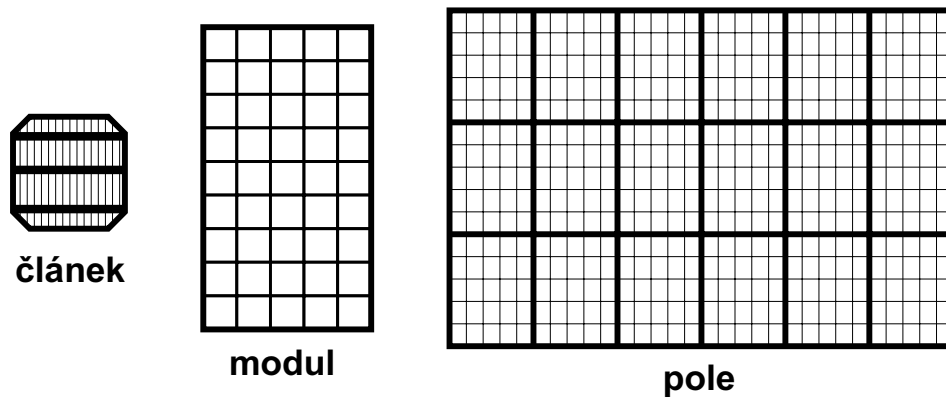
Tento typ kontaktu je poměrně nákladný. Připravuje se buď kondenzací kovových par na rastru vymezeném maskou, ještě vyšší kvality se pak dosáhne použitím fotolitografie.

Alternativou k tomuto typu kontaktu je kontakt vyrobený z průhledného vodivého oxidu jako např. oxid cíničitý SnO_2 . Tenká vrstva z takové látky propouští světelné záření v téměř celém spektru a napařuje se na skleněnou destičku, která tvoří krycí vrstvu článku.

7.6. PARAMETRY SLUNEČNÍCH ČLÁNKŮ

Výkon solárního článku není konstantní. Protékající proud závisí na množství dopadajícího světla, napětí článku klesá s rostoucí teplotou. Proto bylo nutno definovat podmínky, za nichž se provádí srovnávací měření různých typů článků. Nejdůležitějším standardem je přitom výkon článku změřený v poledne na přímém slunci v jasném chladném dni. Teplota článku (nikoli okolního prostředí) musí být 25°C , ozáření by mělo mít hodnotu 1000 W/m^2 . V úvahu se bere i atmosférický vliv jakožto míra rušení (v atmosféře dochází k absorpci a odrazu záření). Typické napětí jednoho zatíženého článku se pohybuje něco pod polovinou voltu; 36 se jich proto řadí do série, aby se získalo napětí cca 14.5–17 V. Takovým modulům se říká 12-voltové, neboť jsou určeny pro napájení 12 V baterií (např. olověná baterie se plně nabije při napětí 13.5 V). Proud se u běžně vyráběných článků o rozměrech několik desítek cm^2 pohybuje mezi 1–4 A.

Poněvadž výkon jednoho článku běžné velikosti se pohybuje na úrovni několika watů, pro vyšší výkony se jednotlivé články skládají do modulů a ty pak do polí (obr. 7.6.1).

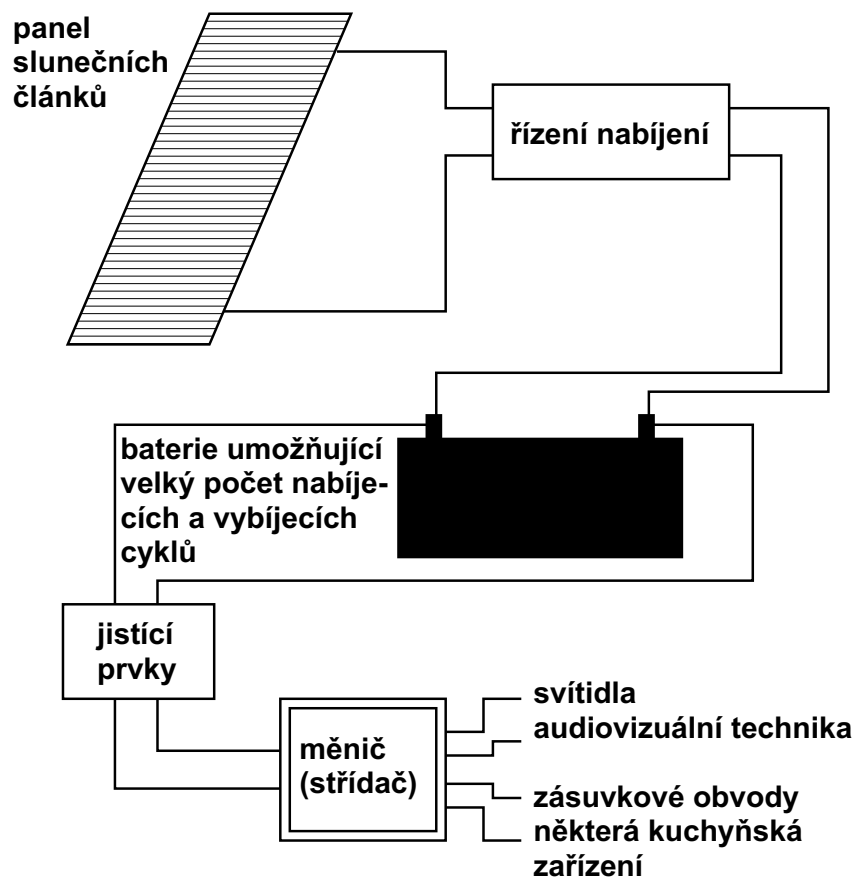


Obr. 7.6.1: Skládání článku do modulů a do polí

7.7. SLUNEČNÍ ČLÁNKY V ENERGETICKÉ SOUSTAVĚ A JEJICH VYUŽITÍ

Energie odebíraná ze slunečních článků se může buď spotřebovávat přímo, nebo je možno ji akumulovat (druhý případ je častější) a využívat později podle potřeby. Přímé využití se obvykle realizuje v drobných spotřebičích jako hodinky a kalkulačky; v tomto případě není ani třeba převádět stejnosměrný dodávaný proud na střídavý. V současné době však již existuje velké množství lokalit, kde se sluneční energie podílí významnou měrou na pokrývání místní spotřeby energie elektrické.

Zapojení slunečních článků do energetického systému se obvykle provádí zprostředkovaně; jimi dodávanou energií se nabíjejí sekundární baterie, z nichž se později energie odebírá. Tyto baterie jsou podobné automobilovým bateriím, ale musí být uzpůsobeny hlubším nabíjecím a vybíjecím cyklům. Bateriím je předřazeno zařízení, které jejich nabíjení řídí a zabraňuje jednak přebíjení, nebo naopak úplnému vybití. Systém je doplněn jistěním a případně měničem transformujícím stejnosměrný proud na střídavý. Schéma zapojení slunečních článků v soustavě je schématicky znázorněno na obr. 7.6.2.



Obr. 7.6.2: Zapojení článků do energetické soustavy

S miniaturními slunečními články se můžeme setkat v různých drobných spotřebičích, zajímavější však jsou jejich aplikace ve větším měřítku. Za všechny lze jmenovat zdroje energie na umělých kosmických tělesech, v menších i větších obytných objektech, ve větších vzdálenostech od energetických sítí (čerpání vody na pastvinách v USA, Jižní Americe a v Austrálii), v různých monitorujících zařízeních atd. Značný rozmach je patrný i v oblasti hybridních systémů, kdy sluneční články pracují paralelně např. s dieslovými agregáty či jinými klasickými zdroji.