

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA v PRAZE

Technická fakulta

Katedra fyziky

Fotovoltaické články a panely na nekřemíkové bázi

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. ing. Martin Libra, CSc.

Autor práce: Tomáš Pícha

Praha 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Fotovoltaické články a panely na nekřemíkové bázi" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne: 5. 4. 2014

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval mému školiteli prof. ing. Martinu Librovi, CSc. za odborné vedení a podnětné rady k vypracování mé bakalářské práce.

Abstrakt: Práce se zabývá popisem a porovnáním některých důležitějších vlastností fotovoltaických článků. Z nekřemíkových článků jsou charakterizovány především články založené na přechodu kadmium/telur, galium/arzen a dále na měď/indium/galium/selenovém komplexu. Okrajově jsou zmíněny články na bázi sloučenin mědi. Dále jsou uvedeny nejčastější systémy organických fotovoltaických článků (organické fotovoltaické články jednovrstvé, na bázi objemového heteropřechodu a barvivem senzitivované organické fotovoltaické články). Závěr obsahuje porovnání některých podstatnějších vlastností jednotlivých článků ve vztahu k jejich praktickému využití.

Klíčová slova: polovodič, fotovoltaický článek, energie

Photovoltaic Cells and Panels Based on the Non-silicon Materials

Abstract: The work describes and compares some attributes of the more important photovoltaic cells. Out of the non-silicon cells, the cadmium/telluride, copper/indium/gallium/selenide and gallium/arsenide systems are characterized. Copper-based cells are noticed marginally. Further, some more frequently used organic photovoltaic cells are described (double-layer and bulk heterojunction organic cells and dye-sensitized organic photovoltaic cells). The comparison of some more substantial features of the presented photovoltaic cells is discussed in relation to their practical utilization.

Key words: semiconductor, photovoltaic cell, energy

Obsah

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Slunce jako zdroj energie ve vesmíru | 2 |
| 3 | Fyzikální podstata světla | 2 |
| 4 | Podstata fotovoltaické přeměny energie | 4 |
| 4.1 | Fotoelektrický jev..... | 4 |
| 4.2 | Princip fotoelektrického jevu..... | 5 |
| 4.3 | Princip fotovoltaického článku..... | 6 |
| 5 | Typy fotovoltaických článků | 11 |
| 5.1 | Přehled používaných FV systémů..... | 11 |
| 5.2 | Konstrukce fotovoltaických článků..... | 13 |
| 5.3 | Třídění fotovoltaických článků..... | 15 |
| 6 | Fotovoltaické články na bázi křemíku | 16 |
| 6.1 | Monokrystalické křemíkové články..... | 16 |
| 6.2 | Polykrystalické křemíkové články..... | 17 |
| 6.3 | FVČ z amorfního křemíku..... | 17 |
| 7 | Druhá generace FVČ, tenkovrstvé články | 19 |
| 7.1 | Kadmium-telurové články, CdTe..... | 20 |
| 7.2 | Fotovoltaické články na bázi CuInGaSe – CIGS..... | 23 |
| 8 | Galium arzenové články, GaAs | 25 |
| 9 | Cu₂O a CuS články | 27 |
| 9.1 | Cu ₂ O články..... | 27 |
| 9.2 | Cu ₂ S/CdS články..... | 27 |
| 10 | Vícevrstvé fotovoltaické články | 29 |
| 11 | Organické fotovoltaické články | 32 |
| 11.1 | Princip organických fotovoltaických článků..... | 32 |
| 11.2 | Typy organických solárních článků..... | 34 |
| 11.3 | Dvojrstvý organický fotovoltaický článek..... | 35 |
| 11.4 | Organické články založené na objemovém heteropřechodu – bulk-heterojunction BJJ FVČ..... | 35 |
| 11.5 | Barvivem senzitivované organické fotovoltaické články - dye-sensitized FVČ, DSSC..... | 36 |
| 12 | Porovnání nejběžnějších typů FVČ | 37 |
| 13 | Závěr | 42 |
| 14 | Literatura | 43 |
| 15 | Seznam zkratk, obrázků, grafů | 46 |

| | | |
|------|-----------------------------|----|
| 15.1 | <i>Seznam zkratek</i> | 46 |
| 15.2 | <i>Seznam obrázků</i> | 46 |
| 15.3 | <i>Seznam grafů</i> | 48 |

1 Úvod

Energie, její kontrolované uvolňování a transformace, jsou základem předpokladem rozvoje lidského společenství, což platí pro současnou technicky orientovanou společnost dvojnásobně. Význam této skutečnosti si uvědomují všechny politicko-ekonomické celky na Zemi. I když lze jednotlivé formy energie mezi sebou za určitých podmínek a s různou efektivitou transformovat, člověk historicky nejdelší dobu využíval převážně její nejpřístupnější formu, a to teplo. Jednalo se o energii chemicky vázanou v dřevní hmotě nebo fosilních palivech, jejímž zdrojem bylo sluneční záření. Teprve v posledních padesáti letech byly v širším měřítku zvládnuty technické možnosti nutné pro uvolňování energie jadernou reakcí. Získávání energie uvedenými postupy však s sebou nevyhnutelně přináší negativní důsledky na životní prostředí. Stoupá procento exhalací jedovatých plynů, například oxidů dusíku a síry, které zapříčiňují smog, kyselé deště i prašnost atmosféry. Jsme svědky globálního oteplování, které, ač je samo o sobě jistě multifaktoriální, je významně posilováno nárůstem podílu skleníkových plynů v atmosféře (1).

Energetika je jednou z nosných součástí boje člověka za přežití. Spotřeba energie bohužel narůstá exponenciálně, v roce 2000 již překročila hodnotu $E=10^{14}$ kWh.rok⁻¹ a pokud by současný trend pokračoval, byla by její spotřeba v roce 2100 o 3 řády vyšší (2). Když se zamyslíme nad negativními důsledky současného objemu výroby energie na životní prostředí, je každému bezpochyby jasné, že další nárůst je beze změny podstaty výroby zničující. Bohužel dosavadní technologické postupy při výrobě a skladování energie jsou ve srovnání s dosaženými technickými úspěchy lidstva kriticky nedokonalé. Pokud pomineme jadernou fúzi, která není v současné době technicky realizovatelná, je jediným zdrojem ekologicky prakticky čisté energie Slunce.

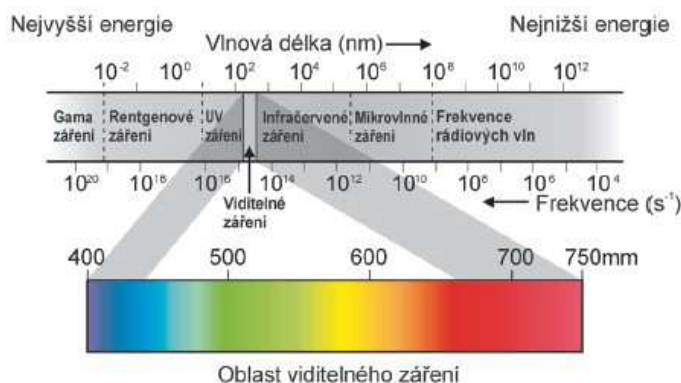
2 Slunce jako zdroj energie ve vesmíru

Slunce je prakticky jediným zdrojem energie ve zkoumání přístupném vesmíru, pomineme-li rozpad radioaktivních prvků v zemském jádře. Energii Slunce získává termonukleární reakcí dvou jader vodíku za vzniku héliového jádra a kvant energie - kinetické energie a fotonů. Celkový zářivý výkon Slunce lze odhadnout jen přibližně. Je to způsobeno řadou faktorů, ke kterým patří samotné kolísání Sluneční aktivity (má přibližně 11letou periodu), další fluktuace i experimentální chyby při měřeních. Zářivý výkon Slunce lze vypočítat přibližně ze vztahu Stefanova - Boltzmannova zákona o záření černého tělesa, přibližný zářivý výkon činí $3,83 \cdot 10^{26}$ W (3). Pouze malá část výkonu dopadá na povrch Země, a to $1,79 \cdot 10^{17}$ W (2). Střední hodnota intenzity záření dopadající na jednotku plochy Země činí přibližně $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota se nazývá solární konstanta. Část energie se od atmosféry odráží a část absorbuje, takže se na povrch dostane intenzita zhruba $I_{max} = 1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Od dubna do října je to přibližně 75% této energie a 25% této maximální hodnoty energie v období od října do dubna. Celková doba slunečního svitu v našich podmínkách se pohybuje v rozmezí $1400\text{--}1800 \text{ h} \cdot \text{rok}^{-1}$ (4). Tuto energii lze potenciálně využívat ve fototermických kolektorech na tepelnou energii a ve fotovoltaických článcích na energii elektrickou. Posledně jmenovaný princip je v současné době nejrozšířenější a pravděpodobně nejefektivnější způsob přeměny solární energie na elektrickou.

3 Fyzikální podstata světla

Světlo bylo od pradávna předmětem zájmu, apoteózy a nakonec i exaktního zkoumání. Bylo považováno za proud částic nebo vlnění, ale teprve Maxwellovi (1831-1879) se podařilo vytvořit jednotnou teorii elektromagnetického pole, která má pro studium světla zásadní význam (5). Vyplývá z ní, že oscilace elektrického a magnetického

pole jsou vzájemně neoddělitelně spojeny a šíří se prostorem konečnou rychlostí – rychlostí světla c . Ve vakuu se šíří elektromagnetická vlna od místa vzniku přímočaře. Vlnová délka elektromagnetické vlny kolísá ve velkém rozsahu více než desítky řádů, jen malou část je schopno vnímat lidské oko a tomuto rozmezí ($\lambda = 380\text{-}760\text{ nm}$) říkáme oblast viditelného světla. Pokud je oko vystaveno celému spektru vnímá ho jako bílou barvu (Obr. 1).



Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření (6)

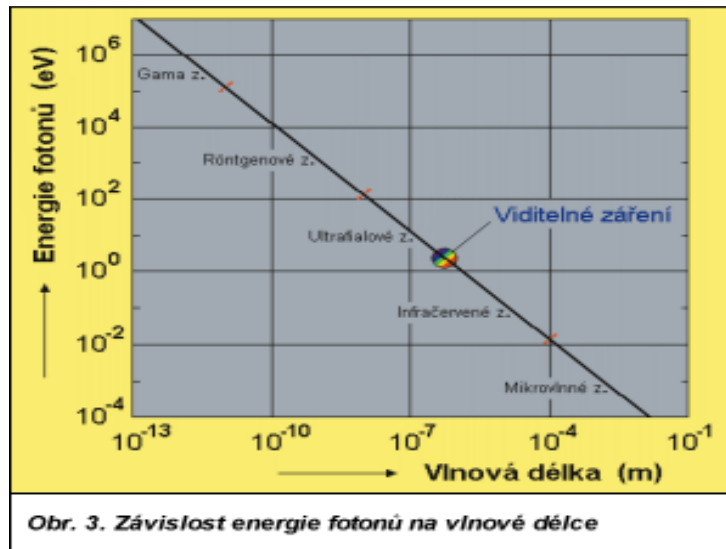
Energie elektromagnetického záření stoupá s klesající vlnovou délkou respektive se stoupající frekvencí a vlivem rozdílných vlastností je elektromagnetické vlnění využíváno v různých oblastech lidského života (fyzika, chemie, medicína, energetika...).

Elektromagnetické vlnění má dualistický charakter. Znamená to, že podle úhlu pohledu má vlnový nebo korpuskulární charakter, i když je jasné, že vše jsou jen kvanta energie, vlnění. Záření se tedy projevuje jako tok „částic“, které se nazývají fotony, jejichž energie se mění v závislosti na vlnové délce podle zjednodušeného vztahu:

$$E = h \cdot \nu \text{ respektive } E = h \cdot c \cdot \lambda^{-1} \text{ přičemž platí } \lambda = c \cdot \nu^{-1} = c \cdot T$$

kde h je Planckova konstanta; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

c rychlost světla; λ vlnová délka, T perioda, graficky je vztah zřejmý z diagramu (Obr. 2).



Obr. 3. Závislost energie fotonů na vlnové délce

Obr. 2 Závislost energie fotonů na vlnové délce světla (7)

Fotony viditelného záření mají energii v rozsahu $E = 1,63 - 3,27$ eV, zatímco záření gama v řádu MeV. Jednou z interakcí záření s hmotou je také fotoelektrický jev, což je emise elektronů po expozici materiálu (především kovů) elektromagnetickému vlnění, nebo anihilace respektive tvorba částice a antičástice.

4 Podstata fotovoltaické přeměny energie

4.1 Fotoelektrický jev

Francouz Alexandre Edmond Becquerel zjistil v roce 1839 při pokusech s elektrochemickými bateriemi, které měly platinové a zinkové elektrody, nárůst elektrického napětí po expozici světlu. V roce 1876 se podařilo analogické jevy vyvolat u selenu a v roce 1883 byl sestaven selenový fotočlánek američanem Charlesem Fritzem. Avšak díky vysoké ceně selenu zůstal jev na úrovni experimentu a k většímu uplatnění došlo až podruhé světové válce (8). V polovině 50. let dvacátého století došlo k překotnému rozšíření polovodičů pro mnoho účelů, mimo jiné i pro rozvoj fotovoltaiky. Hlavním využívaným polovodičovým materiálem se stal v zemské kůře bohatě zastoupený křemík. V Bellových laboratořích byl v roce 1953 sestaven

první solární článek založený na monokrystalickém křemíku. Pearson a Fuller studovali křemíkové diody po osvitě světlem a v roce 1953 sestavili křemíko-arzénový systém s pn přechodem dotovaným bórem, čímž vznikl první křemíkový solární článek na světě. Měl účinnost 6% a objev byl označen za průlom do využívání sluneční energie (8).

4.2 Princip fotoelektrického jevu

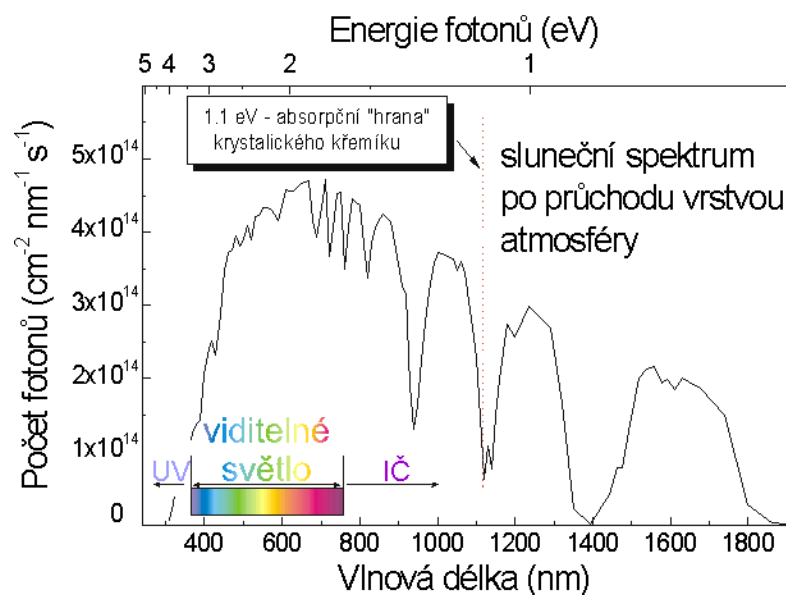
Pro vznik elektrického proudu je nezbytná přítomnost jeho nosičů – volných elektronů. Elektrony jsou v látkách lokalizovány do elektronových obalů v energetických hladinách, kdy směrem od jádra jsou zaplňovány nejprve hladiny o nejnižších energiích, a postupně stoupají na vyšší energetické hladiny až na poslední hladinu valenční. Protože vzestup hladin je nespojitý, jsou odděleny energetickými pásy. Nad poslední (valenční) vrstvou elektronů leží energetický pás de facto bránící jejich volnému pohybu, který je nazýván pásem zakázaným. Za velmi nízkých teplot je tím posledním, který je obsazený elektrony. Nad ním už leží pásy vodivostní, což znamená, že elektrony, které dosáhnou této energetické hladiny, jsou volně pohyblivé.

Vodivost látky je úměrná koncentraci volných nosičů náboje a tato koncentrace závisí exponenciálně na šířce zakázaného pásu. Látky o vhodné šíři zakázaného pásu se stanou po obohacení tří a pětímocnými prvky příměsovými polovodiči a podle účinku na výchozí materiál se člení na p a n v závislosti od toho, zda odevzdávají elektrony (n) nebo je přijímají (p). Pomocí dopování (dotování) polovodiče jednoho typu příměsí opačné vodivosti lze měnit charakteristiky donorové (E_d) a akceptorové (E_p) energetické hladiny, čímž se mění jeho vlastnosti včetně Fermiho hladiny (hladina energie u které je 50% pravděpodobnost, že se elektron vyskytuje nad nebo pod touto hladinou). Na pn přechodu dochází k vytvoření lokálního gradientu koncentrace elektronů.

Po expozici polovodiče zářením o vhodné vlnové délce může dojít k předání energie valenčnímu elektronu, která mu umožní překonání zakázaného pásu. Dojde tedy ke zvýšení jeho vodivosti prostřednictvím zvýšení koncentrace elektronů ve vodivostním pásu a koncentrace děr ve valenčním pásu. Bez připojení do obvodu dochází k porušení rovnováhy, Fermiho hladina se deformuje a rozdíl mezi původní velikostí difuzního potenciálu a velikostí této bariéry se projeví jako napětí (kladné na anodě a záporné na katodě). Dokud není přechod pn připojen k elektrickému napětí, vyrovnávají se místní fluktuační proudy v elektronové mřížce termálními a rekombinantními proudy. Po zapojení do obvodu bude procházet elektrický proud.

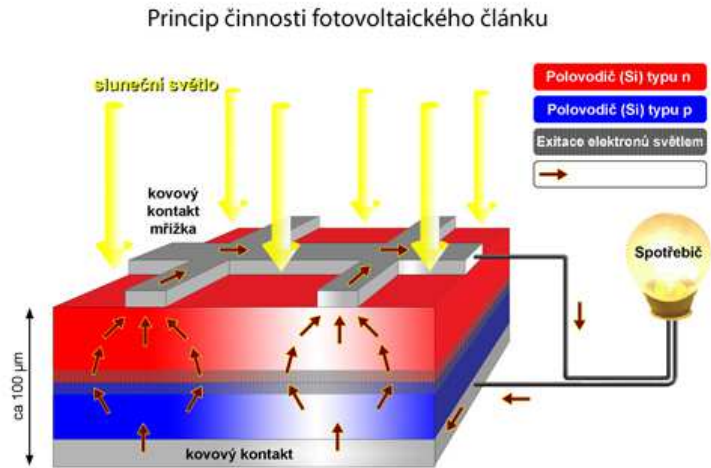
4.3 Princip fotovoltaického článku

Dopadne-li záření na pevnou látku, část se odrazí, část je pohlcena a rozptýlena. Elektrony s menší energií, než je šířka zakázaného pásu polovodičem volně procházejí, zatímco ty s větší nebo rovnou E_g vytvářejí páry elektron-díra a tak jsou zachyceny - generují elektrický proud. Při vyšších energiích dopadajících fotonů může zbývat elektronům excitovaným do vodivostního pásu větší energie, než k nárazové ionizaci. Pak počet elektronů generovaných jedním fotonem bude úměrný jeho primární energii. Tímto mechanismem je tedy umožněn posun elektronů proti směru intenzity elektrického pole. Křemík, nejčastěji používaný materiál ve FVČ, má šířku zakázaného pásu přibližně $E_g = 1,1$ eV. Fotony s nižší energií než je přibližně $\lambda = > 1100$ nm tedy procházejí a ostatní jsou absorbovány (Obr. 3).



Obr. 3 Sluneční spektrum po průchodu atmosférou pod úhlem 48° od normály (tzv. spektrum AM 1,5). Současně je vyznačena absorpční hrana krystalického křemíku (9)

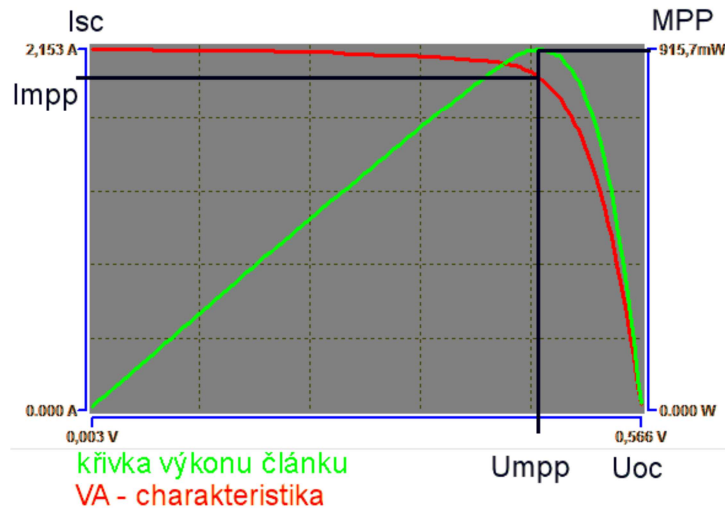
Fotovoltaický článek je velkoplošná dioda a její přechod pn je orientován kolmo ke směru dopadajícího světla. Na pn přechodu, v oblasti vzniklého elektrického pole prostorového náboje, jsou elektrony usměrněny na jednu stranu a díry na druhou, kde je sbírají vnější kontakty. Přední kontakt exponovaný světlu přijímá elektrony, je to mřížka nebo hřeben, který zabírá velmi malou plochu (cca 4-8% plochy článku), aby nebránil přístupu světla, a zadní celoplošný kontakt (reflektor) přijímá díry (Obr. 4). Na kontaktech takto vznikne napětí U_{oc} , které je v případě křemíku rovno 0,5-0,6V. Pokud připojíme ke kontaktům spotřebič, protéká jím stejnosměrný elektrický proud.



Obr. 4 Schéma energetických změn po absorpci světla v polovodiči pn přechodu krystalického křemíku, situace ve FVČ; šipkami označen tok elektronů (10)

Mezi základní charakteristiky FVČ mimo jiné patří (11):

- účinnost η daná poměrem maximálního výkonu MPP a osvětlení článku P_{IN} ; $\eta = MPP \cdot P_{IN}^{-1}$
- proud nakrátko I_{SC}
- napětí naprázdno U_{OC}
- paralelní odpor R_P odrážející poruchy v článku
- sériový odpor R_S , představuje elektrické ztráty
- bod maximálního výkonu (MPP) nebo také P_{MAX}
- činitel plnění (fill factor) FF , který je dán poměrem MPP a ideálního výkonu dodávaného článkem



Obr. 5 V-A charakteristika FVČ. Červená: V-A charakteristika; černá: maximální výkon $I_{MPP} \cdot U_{MPP}$; zelená: výkon článku; průsečík černá x červená: bod maximálního výkonu, MPP (11)

Volt – ampérová charakteristika patří k základním parametrům. Při spojení fotovoltaického modulu nakrátko jím protéká maximální neboli zkratový proud I_{SC} . Tento proud je omezený a je závislý na osvětlení. Není-li FVČ připojen do obvodu, neprotéká proud a články se nachází ve stavu chodu naprázdno, v tomto zapojení se nastává napětí U_{OC} . U křemíkových monokrystalických článků se pohybuje toto napětí kolem 0,6 V. Závislost proudu a napětí v intervalu mezi spojením nakrátko a chodem naprázdno je znázorněna na obrázku (Obr. 5). Při spojení nakrátko článkem protéká zkratový proud - I_{SC} , který představuje maximální proud, který může fotovoltaický článek při dané intenzitě slunečního záření dodávat. Velikost tohoto proudu je závislá zejména na: a) intenzitě osvětlení, b) spektrální citlivosti FVČ, c) ploše článku a d) teplotě (a samozřejmě na typu FVČ). Velikost proudu nakrátko se pohybuje řádově v desítkách mA až několika A. U kvalitních křemíkových FVČ dosahuje tato při plném osvětlení až 6A.

Maximální výkon FVČ je patrný též z obr. 5. Ten v praxi lze dosáhnout, je-li k modulu připojen invertor (měnič), který automaticky nastavuje MPP napětí na fotovoltaickém modulu, nebo je-li připojena baterie s napětím blízkým U_{MPP} . Proud a výkon fotovoltaického

modulu klesá s poklesem intenzity osvětlení, tedy s počtem absorbovaných fotonů. Sníží-li se intenzita slunečního svitu dvakrát, klesne na polovinu i výkon fotovoltaického modulu. Výkon klesá také při vysokých teplotách, například nárůst teploty o 25°C sníží výkon křemíkových fotovoltaických článků přibližně o 10%. Proto je třeba při instalaci brát na vědomí odvětrávání a ochlazování modulů například proudem vzduchu. Aby bylo možné srovnávat jednotlivé fotovoltaické moduly, byly dohodnuty mezinárodní standardizační podmínky (STC). Výkon slunečních fotovoltaických článků *MPP* je určován a srovnáván při intenzitě osvětlení 1000 W·m⁻² a teplotě modulu 25°C. Vzhledem ke skutečnosti, že intenzita světla bývá většinou nižší a v létě se fotovoltaické moduly zahřívají až k teplotám kolem 60°C, udávají hodnoty výkonu *MPP* většinou maximální hodnotu, která v praxi nebývá často dosažena a ještě méně často se jí podaří překročit. Proto se hodnota výkonu udává v jednotce „Watt Peak“, zkráceně Wp.

Účinnost je dána maximálním výkonem v bodě *MPP* a výkonem dopadajícího záření:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E \cdot A_C}$$

kde je

P_m - max. výkon, který může článek dodávat (bod P_m FVČ je na V-A charakteristice zhruba uprostřed ohybu křivky V-A charakteristiky)

P_{rad} - výkon dopadajícího záření

E - intenzita osvětlení (ozáření) při standardizovaných zkušebních podmínkách (W·m⁻²)

A_C - plocha FVČ (m²) (12)

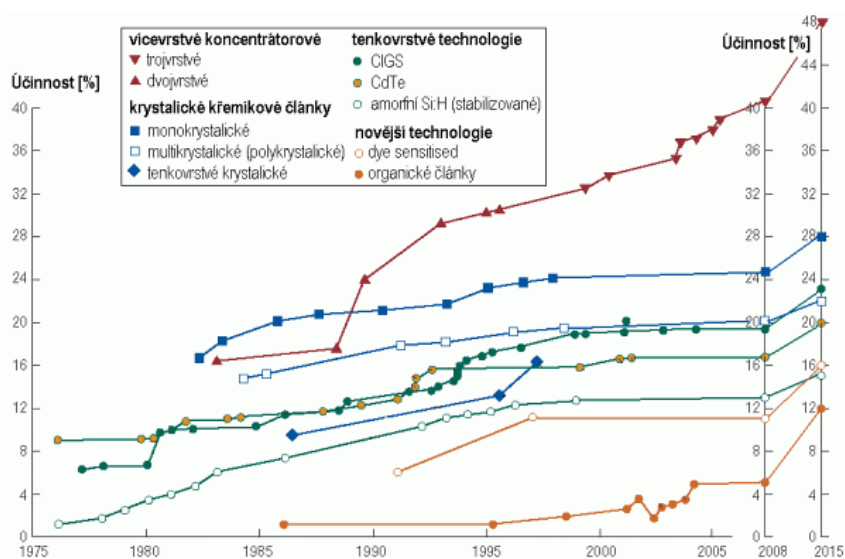
5 Typy fotovoltaických článků

5.1 Přehled používaných FV systémů

Účinnost FVČ respektive jejich modulů je ovlivněna řadou faktorů, ke kterým patří zejména:

- 1) Polovodičový systém, jeho složení a uspořádání
- 2) Vlastní konstrukce FV článku, sběr elektrického proudu
- 3) Složení, koncentrace a absorpce světelného záření

Každý z uvedených okruhů zahrnuje velmi složité a vzájemně se ovlivňující vztahy. Celková účinnost FVČ stoupá během let, jak je patrné z grafu (Graf 1).



Graf 1. Graf vývoje účinnosti FVČ v průběhu let (%) (13)

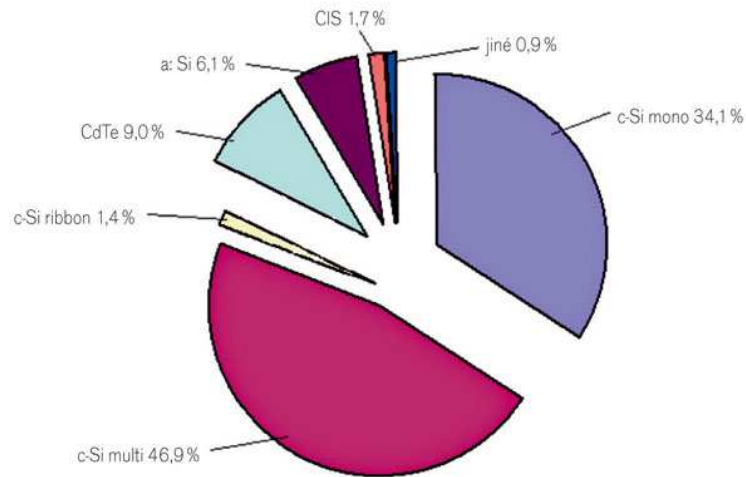
Zatímco první komerčně dostupné FVČ měly účinnost přibližně 6%, nyní jsou v prodeji systémy o účinnosti 20% a více (Tab. 1).

Tab. 1 Maximální uváděná účinnost pro různé typy solárních článků v roce 2005 (37)

| Typ FVČ | Nejvyšší udávaná účinnost v laboratorních podmínkách ¹ | Nejvyšší účinnost v terénních podmínkách - modulu ¹ |
|----------------------------------|---|--|
| Monokrystalický Si | 24.7% (UNSW, PERL) | 22.7% (UNSW/Gocher-mann) |
| Polykrystalický Si | 20.3% (FhG-ISE) | 15.3% (Sandia/HEM) |
| Amorfní Si:H | 10.1% (Kaneka), N.B. singlejunction | Trojvrstvý – stabilizovaná účinnost 10.4% |
| Vícevrstvé mikro-Si/amorfní Si:H | 11.7% (Kaneka), N.B. minimodule | 11.7% (Kaneka), minimodul |
| HIT FVČ | 21% (Sanyo) | 18.4% (Sanyo) |
| GaAs | 25.1% (Kopin) | Irelevantní |
| InP | 21.9% (Spire) | Irelevantní |
| GaInP/GaAs/Ge vícevrstvé | 32% (Spectolab), N.B. 37.3% underconcentration | Irelevantní |
| CdTe | 16.5% (NREL) | 10.7% (BP Solarex) |
| CIGS | 19.5% (NREL) | 13.4% (Showa Shell), pro CuGaInSeS systém |
| Barvivem senzitivovaný FVČ | 8.2% (ECN) | 4.7% sub-module (INAP) |

Pozn. HIT FVČ: monokrystalický křemíkový FVČ obklopený ultratenkým amorfním křemíkovým systémem; ¹ výrobce

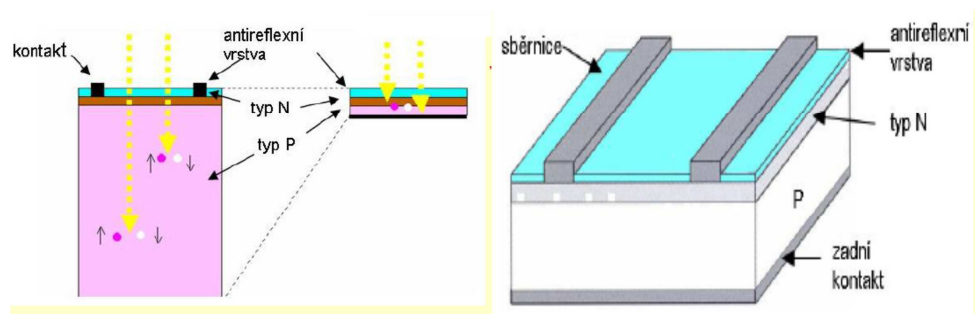
Některé typy laboratorně vyrobených článků mají účinnost ještě podstatně vyšší (přes 40%) (14), avšak jejich vysoká cena omezuje plošné použití, jsou aplikovány na malé systémy a speciální účely (elektrotechnika, astronautika apod.). Rámcový přehled světového trhu s FVČ poskytuje následující graf (Graf 2).



Graf 2. Podíl jednotlivých typů FVČ na světovém trhu v roce 2009. cSi multi: polykrystalické křemíkové; cSi mono: monokrystalické křemíkové; cSi ribbon: vícevrstvé křemíkové; aSi: amorfni křemíkové; CIS: CuInSe FVČ (15)

5.2 Konstrukce fotovoltaických článků

Celosvětově jsou nejvíce rozšířeny fotovoltaické články na bázi křemíku z důvodů nejvýhodnějšího poměru cena/účinnost. Jako příklad bude uvedena konstrukce tohoto článku (Obr. 6).

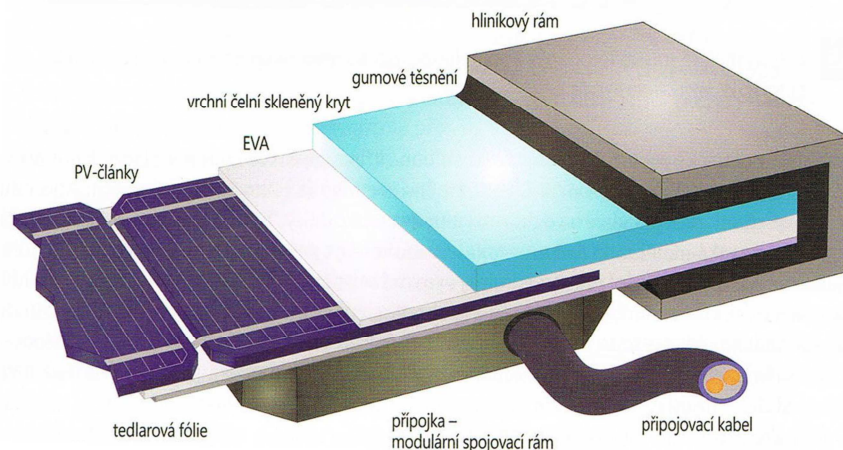


Obr. 6 Schématické zobrazení FVČ podle (16)

FVČ v základním uspořádání obsahuje ve směru procházejícího světla pod krycím materiálem antireflexní vrstvu, která brání jeho zpětnému odražení. Tato vrstva je protkána sítí sběrnice (jsou v běžných

článcích plošné, pro vyšší proudy například vnořené do polovodičové vrstvy), které odvádějí generovaný elektrický proud. Vlastní těleso článku je tvořeno polovodiči p a n a jejich rozhraním, kde dochází k fotoelektrické rekombinaci. Na zadní straně je druhý elektrický kontakt - většinou kovová vodivá deska. U složitějších zařízení může nést další vrstvu, která upravuje světelné a elektrické charakteristiky soustavy. Byly vytvořeny složitější systémy, které obsahují vícenásobné vrstvy polovodičových materiálů, další součásti optimalizující průchod a absorpci světla, charakteristiky pn přechodů, případně další vylepšení, z nichž některé jsou uvedeny dále.

Jednotlivé FVČ se skládají do panelů, které v terénu vyrábějí elektřinu a mají za cíl je mechanicky chránit. Mezi sebou jsou FVČ elektricky zapojovány sérioparalelně podle konkrétně požadovaného napětí a výkonu. Maximální výkon záleží na velikosti panelů a množství absorbovaného světla. Příklad sestavy je uveden níže na obrázku (Obr. 7).



Obr. 7 Schéma fotovoltaického panelu (17)

Životnost elektrárenských FV panelů je projektována na 20-30 let. Také v oblasti konstrukce FV panelů probíhá intenzivní výzkum, jeho výsledkem jsou četné aplikace umožňující například využívat odraženého světla (oboustranné články), flexibilní nosné fólie

dovolují snadný transport, přidávání polopropustných mikrovrstev vyvolává barevné dekorativní efekty a podobně.

5.3 Třídění fotovoltaických článků

Klasifikace fotovoltaických článků není ujednocena, pro orientaci jsou hlavní typy článků shrnuty v následujícím přehledu (modifikováno podle (18), (19)):

A. První generace - články na bázi křemíku

- a. Monokrystalické
- b. Polykrystalické

B. Druhá generace - tenkovrstvé články, články s vícenásobnými vrstvami (jejich tloušťka je v řádech mikrometrů):

- a. články z amorfního křemíku (a-Si:H)
- b. CdTe (kadmium – telur) články
- c. CIS, CuInSe (měď – indium – selen) články
- d. CIGS, CuInGaSe (měď – indium – galium – selen) články
- e. GaAs (galium – arzén) články
- f. organické FVČ (barvívem senzitivované FVČ články, FVČ na bázi objemového heteropřechodu ...)

C. Třetí generace

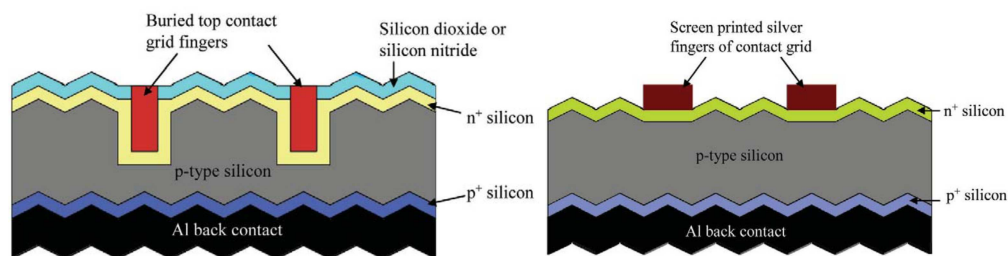
- a. koncentrátorové články – světelné záření je koncentrováno optickým systémem (čočkou)
- b. články, které využívají pro vytvoření více párů elektronů a děr „horké“ nosiče náboje

- c. články založené na termofotovoltaické přeměně – absorpční vrstva je i radiátorem energie
- d. články založené na termofotonické přeměně, kde absorpce je zajištěna elektroluminiscencí
- e. články založené na kvantových jevech v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- f. prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy

6 Fotovoltaické články na bázi křemíku

6.1 Monokrystalické křemíkové články

Křemík je v dnešní době nejvíce využívanou surovinou pro výrobu solárních článků. Nejvyšší komerčně vyráběné monokrystalické křemíkové články dosahují účinnosti přes 22%, (SunPower) a běžná je účinnost 12 – 18 %. Ve srovnání s polykrystalickým křemíkem jsou monokrystalické dražší, ale lépe absorbují přímé sluneční záření (schopnost absorpce difúzního záření je nižší). Proto jsou vhodné pro systémy využívající natáčení za Sluncem. Monokrystalické FVČ jsou velmi rozšířeny, vyznačují se dobrou stabilitou výkonu a relativně dobrou účinností. Nevýhodná je vyšší cena díky potřebě vysoce čistého křemíku. Jsou používány zejména pro velké instalace (Obr. 8) (4).



Obr. 8 Schematické zobrazení křemíkových FVČ se zataveným (vlevo) a naloženým (vpravo) sběrným kontaktem (20)

6.2 Polykrystalické křemíkové články

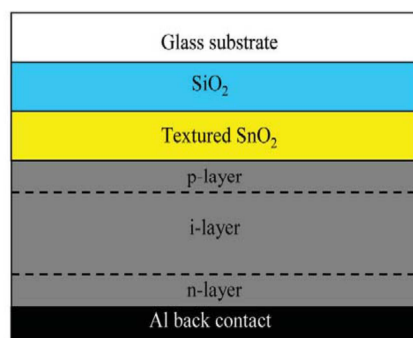
Pro FVČ na bázi polykrystalického křemíku není zapotřebí materiál takové čistoty, jako je tomu u předchozích článků. Účinnost průmyslově vyráběných polykrystalických křemíkových článků již překročila 17 %, ale v terénu získané hodnoty jsou obvykle nižší (15 %) (8). Nižší účinnost je dána především ztrátami rekombinací na hranicích zrn (krystalů), a proto je snaha vyrábět články s co největšími zrny. Další výhodou především pro naše klimatické podmínky je lepší absorpce rozptýleného záření. V současnosti mají navíc články z polykrystalického křemíku nejlepší poměr cena/výkon a jsou tak na dnešním trhu nejrozšířenější. Tyto články tedy představují optimální volbu, pokud je plocha, na které panely umísťujeme relativně omezená (8).

6.3 FVČ z amorfního křemíku

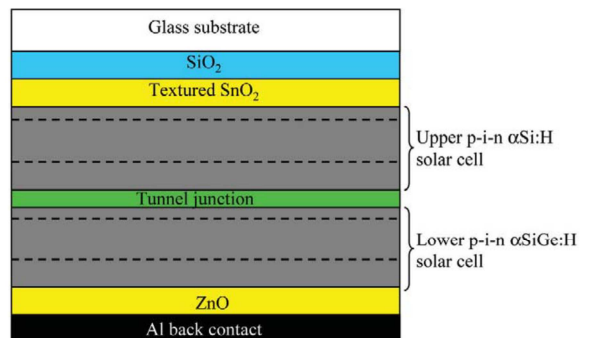
Články z amorfního křemíku mají oproti dvěma výše uvedeným typům výhodu nižší spotřeby suroviny při sériové výrobě a jsou tedy levnější. Vhodná šířka zakázaného pásu (1,7 eV) a značně vysoký součinitel absorpce viditelného světla (větší než 10^{-6} m^{-1}) dovolují snížit absorpční vrstvu na několika málo μm (již vrstva o tloušťce 1 μm pohltí 90 % slunečního záření). Také lze poměrně snadno vytvářet vrstvy s různou šířkou zakázaného pásu pomocí dotování či legování prvky jako jsou dusík, cín, uhlík, germanium a další. Nízká energetická náročnost výroby (přibližně 10 % proti

předchozím typům) a malá spotřeba křemíku (cca 1 %) kompenzují nižší energetickou účinnost (5-8 %) (4). Nevýhodou FVČ z amorfnního křemíku je rychlejší ztráta účinnosti způsobená degradací polovodičové vrstvy vlivem záření. Krystalické články jsou z tohoto pohledu stabilnější – ty vykazují spíše ztrátu optických vlastností. FVČ z amorfnního křemíku lze vyrobit jako velmi tenké a ohebné a moduly z nich se dají proto používat jako krycí fólie na střechy nebo připevnit na flexibilní podklad. FVČ z amorfnního křemíku lze vyrábět jako tenkovrstvé buď samostatně (Obr. 9), ve vícevrstvých aplikacích, nebo se kombinují s dalšími polovodičovými materiály také ve vícevrstvěm uspořádání (viz dále).

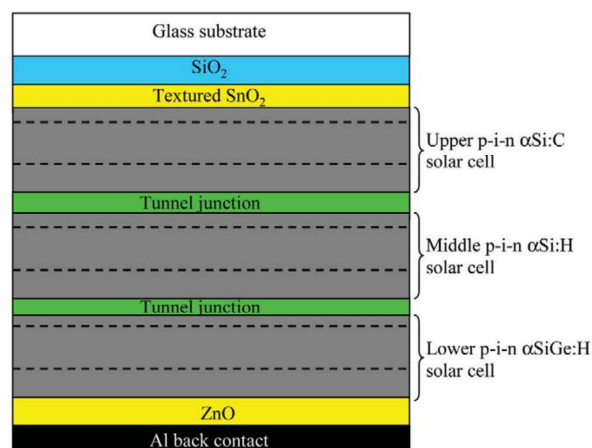
A.



B.



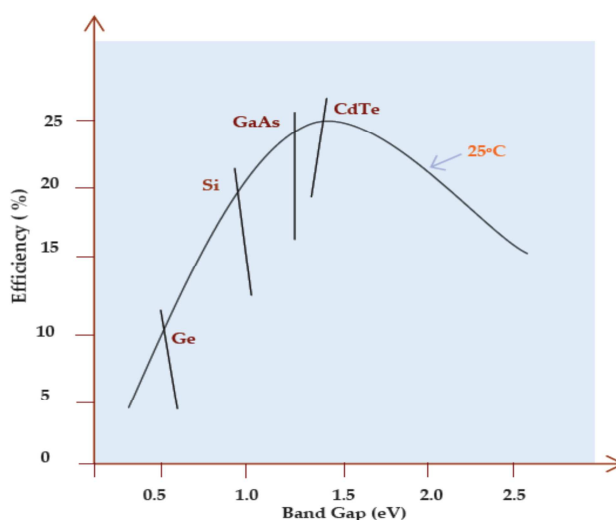
C.



Obr. 9 Schematické zobrazení FVČ z amorfnního křemíku: jednovrstvý (A), dvojevrstvý (B) trojevrstvý (C) (20)

7 Druhá generace FVČ, tenkovrstvé články

Hlavním stimulem pro výzkum nových materiálů pro FVČ je snaha o vyšší účinnost, získat speciální vlastnosti, případně snížit ekologickou toxicitu. Kromě tenkovrstvých článků z amorfního křemíku, které jsou uvedeny v předešlé stati, patří do této skupiny FVČ vyrobené z řady polovodičových materiálů jako jsou indium, galium, germanium, arzen, měď, selen, telur a dalších, přičemž jednotlivé prvky a jejich sloučeniny jsou mezi sebou kombinovány. Jsou to polovodiče prvků I-II_B, III_A a V-V_A skupiny periodické tabulky. Z uvedených komponent jsou konstruovány vícevrstvé systémy. Studie ukázaly, že pro pozemní aplikace je nejvýhodnější použití materiálů se šířkou zakázaného pásu v oblasti 1,5 eV, která je přítomna u polovodičů typu kadmium-telur (CdTe), indium-selen (InSe), galium arzen (GaAs), a měď indium diselen (CuInSe₂, $E_g=1.05$ eV) nebo kombinace prvků první (měď) a třetí skupiny (indium, galium) a amorfní křemík aSiH, ($E_g=1,7$ eV). V praxi je nejvíce používáno rozmezí zakázaného pásu $E_g=1,0-1,7$ eV (porovnání účinnosti FVČ viz též tab. 1. výše, srovnání účinnosti FVČ ve vztahu k šířce zakázaného pásu viz graf energií zakázaných pásů některých materiálů (Graf 3).



Graf 3. Porovnání účinnosti FVČ ve vztahu k šířce zakázaného pásu (21)

Tyto typy FVČ mohou mít dobrou odolnost vůči krátkovlnnému záření při použití v kosmickém prostoru, nebo v dalších speciálních podmínkách. Účinnost některých FVČ tohoto typu je vysoká, při laboratorní výrobě převyšuje 30 % a jejich teoretická účinnost by mohla dosáhnout i 60 % (až 80 %). Samozřejmě, tomu odpovídá vyšší cena, která brání plošnému použití v energetice.

Některé aplikace (např. typu chalkogenidů - sloučenin síry, selenu či teluru - na bázi CuInSe, CdTe nebo na bázi heteropřechodů mezi různými druhy polovodičů) mohou být i cenově únosné při účinnosti kolem 10 %. To umožňuje komerční využití pro vhodné účely. Jejich hendikepem zůstává rychlý pokles účinnosti vlivem působení intenzivního slunečního záření. Mívají proto také použití např. v miniaturních zdrojích v elektronice.

K nejvíce rozšířeným kombinacím patří CdTe nebo CuInSe₂, starší systémy obsahující kadmium (např. CdS/CdTe), jsou z důvodu toxicity nahrazovány v současnosti nejperspektivnějším systémem CuInSe₂, s případným dalším přidáním galia a síry.

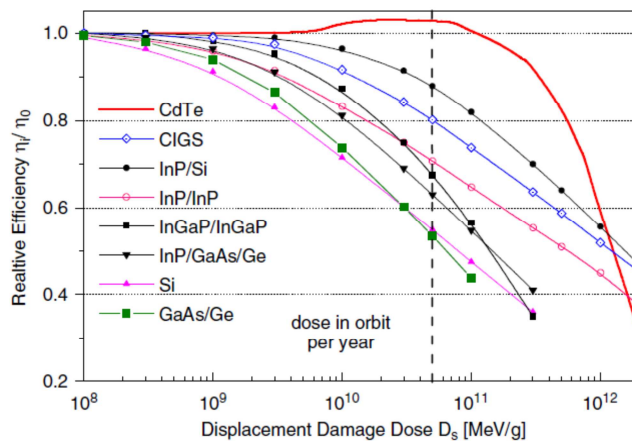
Všechny tyto články používají heteropřechod mezi n-tytovým průhledným materiálem ("okénko") a slabě p-tytovým materiálem ("absorbér" viditelného a části infračerveného záření). Absorpce světla v těchto materiálech s tzv. přímými optickými přechody je velmi silná, stačí vrstva tloušťky několika μm . Zatímco laboratorní články dosahují účinnosti až 18 %, problémem je kvalitní velkosériová depozice složitého systému Cu-In-Ga-Se-S pomocí "levných" technologií. Tyto tenkovrstvé články v současné době přicházejí do hromadné výroby v USA (Siemens Solar) s účinností fotovolatických panelů nad 12 % (9).

7.1 Kadmium-telurové články, CdTe

CdTe články patří do skupiny II_B-VI_A polovodičů se zakázaným pásem ($E_g = 1,5 \text{ eV}$) velmi dobře interferujícím se slunečním spektrem,

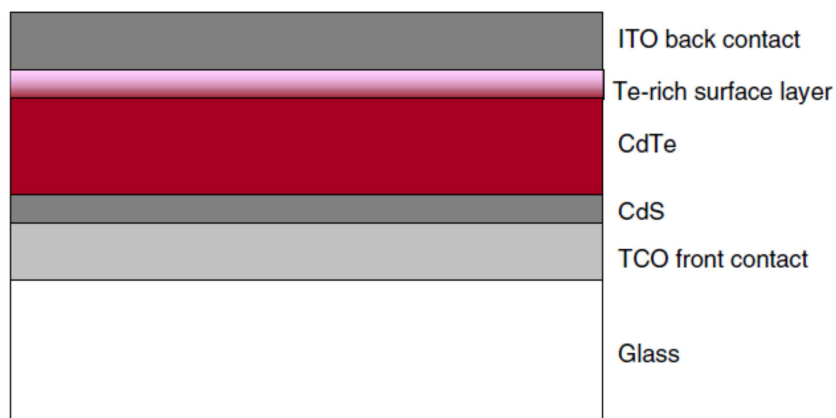
mají vysokou hladinu absorpce ($>5 \cdot 10^5 \text{ m}^{-2}$), vrstva $1 \mu\text{m}$ je schopna absorbovat 90% slunečního spektra. Poprvé byly CdTe krystaly připraveny v roce 1947. O 10 let později byly provedeny první pokusy o využití tohoto materiálu ke konverzi světla na úrovni homogenního pn přechodu s účinností kolem 2 % (22). Od 60let byly studovány možnosti zvýšení účinnosti pomocí heterogenního rozhraní. Byly zkoušeny mono i polykrystalické vrstvy a v 70letech dosáhla účinnost Cu_2CdTe článků $>7 \%$. Současně začaly být testovány heteropřechody In_2O_3 a Sn, případně ZnO, SnO_2 CdS a nebo TiO_2 . Účinnost dosahovala až 10,5 % (23). Výhodou CdTe FVČ je relativně snadná a levná výroba napařováním. Teoretická CdTe účinnost je až 30 %, běžně vyrobené články obvykle dosahují účinnosti 7- 12 % (až 16 %) (24).

CdTe vrstva může být připravena řadou způsobů, které se liší účinností i technologickou náročností výroby, tedy cenou (25). Nejjednodušší a nejlevnější je galvanické nanášení aktivních vrstev. Použitím efektivnější technologie sublimace (CSS, closed space sublimation) lze dosáhnout i vyšší účinnosti (16,5 %) (26). Tyto CdTe/CdS články lze obtížně aplikovat na flexibilní polymerní materiály z důvodu vyšší výrobní teploty, přesto byly vhodné technologie nalezeny (25). K jejich výhodám ale patří velká odolnost proti vysokoenergetickému záření, jak je vidět z následujícího grafu (Graf 4).

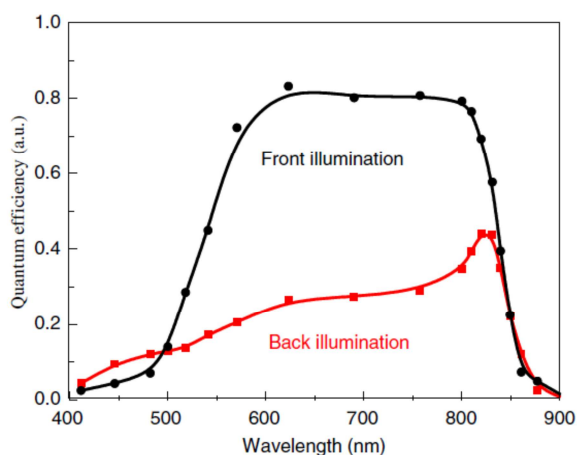


Graf 4. Pokles účinnosti některých FVČ po expozici vysokoenergetickému záření (26)

Technickým problémem je dlouhodobá stabilita p-kontaktu CdTe, která je řešena depozicí velmi slabé mezivrstvy kovu (Cu, Sb, Ni) nebo chalkogenidů (HgTe, Sb₂Te₃, ZnTe, Cu_xTe apod.) a vrstvy Mo, Au, Al a dalších kovů (ilustrační schéma na obrázku Obr. 10) (27). Použití zadní transparentní vrstvy umožnilo další zvýšení účinnosti CdTe článků v případě zadního osvitů (Graf 5) (28).



Obr. 10 Ilustrační schéma CdTe FVČ (26)



Graf 5. Schéma oboustranného CdTe FVČ s grafem účinnosti při předním a zadním osvitu (26)

Přes intenzivní výzkum zůstaly při výrobě tenkovrstvých CdTe/CdS článků dva důležité nedořešené problémy - nanášení CdTe depozita na CdS a nutnost použití chlóru a kyslíku při výrobě. Jinak je výroba je relativně efektivní, z ekologického hlediska mají CdTe FVČ nejnižší výrobní CO₂ náročnost, nízkou spotřebu vody a nejrychlejší finanční návratnost (29). K hlavním nevýhodám patří toxicita použitého kadmia a potenciální nedostupnost teluru.

V uplynulých 20 letech došlo k podstatným vylepšením struktury CdTe článků, proudová hustota je srovnatelná s GaAs FVČ. Napětí naprázdno (U_{OC}) a činitel plnění (FF) jsou omezeny vysokou rekombinací, ale nakonec bylo dosaženo 80% hodnoty přítomné u GaAs FVČ (30). Současný stav vývoje CdTe FVČ dává předpoklady pro plnou konkurenceschopnost v komerčním využití.

7.2 Fotovoltaické články na bázi CuInGaSe- CIGS

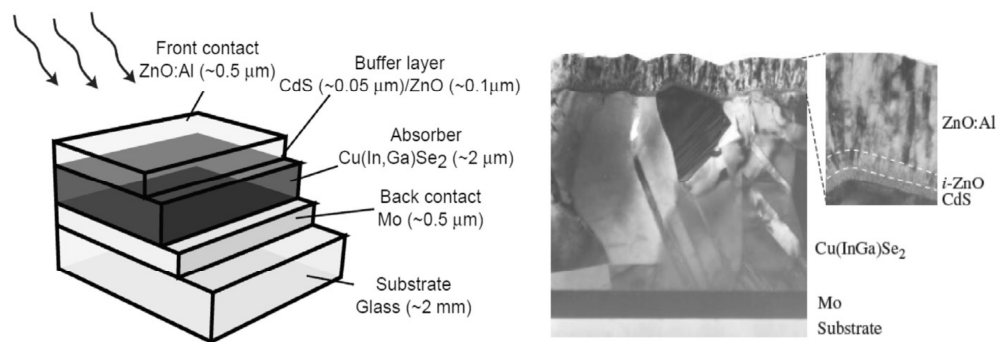
FVČ zahrnuté v tomto oddíle tvoří relativně heterogenní skupinu. Při jejich konstrukci byla používána řada variant hlavních komponent india, germania a selenu spolu s dalšími kovy v různých sendvičových uspořádáních. Je proto obtížné podat kompletní přehled, proto byly vybrány některé rozšířenější nebo jinak zajímavé kombinace.

Díky vysoké účinnosti byly Cu(InGa)Se_2 CIGS články vždy považovány za perspektivní. Byla to zejména snadná příprava tenkých vrstev, vysoký poměr fotoelektrické účinnosti ve vrstvách o síle několika mikronů a výhodná výroba monokrystalicky propojených vrstev (monolithically interconnected). Komerčně vyráběné články již před 10 lety dosahovaly účinnosti téměř 20 % a při velkoplošné instalaci modulů účinnost 12 % (31). To vše při velmi dobré terénní stabilitě modulů. Oproti křemíkovým článkům mají Cu(InGa)Se_2 vysokou radiační odolnost a v kombinaci s flexibilními nosnými povrchy mohou být vyrobeny jako velmi lehké, což slibuje uplatnění ve vesmírném použití.

Ačkoliv Ga a In mají velmi podobné vlastnosti, dlouho byl studován především CuInSe absorpční systém a proto o něm existuje nejvíce literárních zkušeností. Teprve po roce 1990 dochází také k rozvoji přípravy CuGaSe , a CuInGaSe článků. CuInSe_2 články byly nejprve popsány Hahnem v roce 1953 (32), ale podrobněji byly zkoumány až v 70letech v Bellových laboratořích. Zde byly poprvé systematicky definovány jejich elektrické, optické i strukturální vlastnosti (spolu s dalšími chalkopyritovými FV materiály) (33). Ukázalo se, že obohacení absorpční vrstvy o Ga, které začalo být více využíváno po roce 1990, vedlo ke zlepšení parametrů těchto FVČ. Dalším pozitivním postupem bylo obohacení směsi o nízký obsah Na (cca do 0,1 %) (34). Poměrně málo pozornosti bylo zpočátku věnováno přípravě monokrystalických CuInSe_2 článků pro obtížnou výrobu kvalitních monokrystalů, a proto byl hlavní zájem směřován na přípravu tenkovrstvých FVČ. První s účinností 9,4 % byly vyrobeny firmou Boeing (35).

Polovodič n-typu (často nazývaný „buffer“) na povrchu CIGS absorpční vrstvy je zapotřebí pro stabilizaci elektrického pole na pn přechodu. Emitované elektrony jsou posunovány k n-vrstvě díky elektrickému poli, což generuje elektrický proud. Za ideálních podmínek buffer vykazuje vyšší hustotu náboje než absorpční vrstva, což

sem posunuje většinu oblasti prostorového náboje a zvětšuje absorpci. Pro efektivní transport elektronů je zapotřebí zajistit přední i zadní kontakt s vysokou vodivostí a navíc přední musí být maximálně transparentní, proto často obsahuje kovovou mřížku snižující odpor. Zadní kontakt bývá tvořen kovovým filmem, pokud při konstrukci oboustranných článků není semitransparentní (Obr. 11). Zadní kontakt může být tvořen molybdenem o síle 0,5-1 μm . Absorpční CIGS vrstva, bývá přibližně 2 μm silná, pn přechod je stabilizován CdS chemicky deponovaným (chemical bath deposition, CBD) o síle cca 50 nm. Dále směrem k přední straně je nanášena vnitřní vrstva ZnO („intrinsic“, i-ZnO o síle 50 nm) a hliníkem obohacený ZnO (ZnO:Al) jako přední kontakt (300 – 700 nm). Nakonec je umístěna kovová mřížka (NiAl) a finální antireflexní vrstva (MgF_2). Po roce 1990 započaly experimenty s inkorporací natria do soustavy CIGS článku, protože byl experimentálně zjištěn pozitivní efekt. Po příčinách se pátrá.

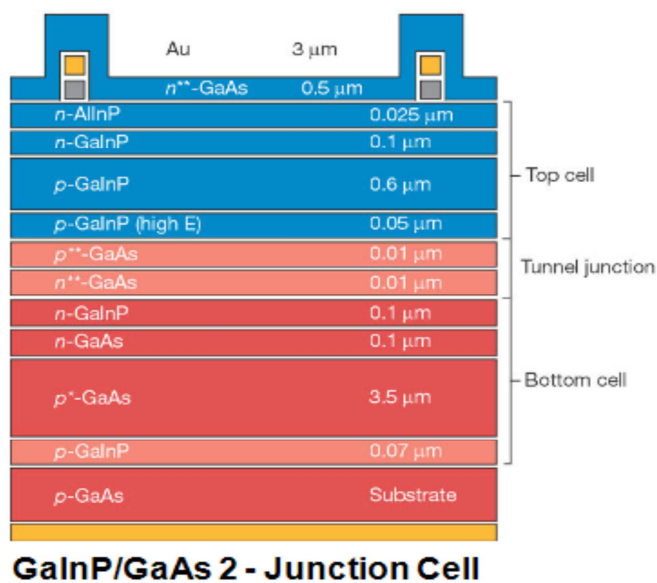


Obr. 11 Schéma CIGS článku (36)

8 Galium arzenové články, GaAs

Galium arzenový polovodičový systém spolu s indium fosfor (In/P) a galium antimonovým (Ga/Sb) rozhraním patří do skupiny III/V polovodičů. Mají příhodné polovodičové vlastnosti a v čistém krystalickém stavu mohou být použity pro výrobu FVČ. InP má zaká-

zaný pás v oblasti 1,34 eV a GaAs 1,424 eV. Oba jmenované materiály jsou využívány v tenkovrstvém uspořádání samostatně, nebo jako součást vícevrstevných systémů, GaAs přechod je více rozšířen (37). Existuje řada způsobů, jak připravit krystaly GaAs - především depozicí par, v posledních letech jsou vypracovávány technologie na výrobu nanokrystalických článků. Přes vysokou cenu především galia je konečný energetický profit vysoký. GaAs články mají v jednovrstvém uspořádání účinnost 25-30 %. V kombinacích s dalšími polovodiči je účinnost ještě vyšší (38). Uvedený typ polovodiče je zvláště vhodný pro vícevrstvé články pro vysoký absorpční koeficient (Obr. 12). Ve srovnání s krystalickým křemíkem je absorpce o 2 řády vyšší (39). Dále má poměrně značnou odolnost vůči poklesu výkonu při vyšší teplotě a radiaci. Největší překážka pro větší rozšíření je vysoká cena. Nelze zcela pominout toxicitu arzenu, která je ovšem největší ve formě oxidů potenciálně uvolněných při požáru. Tento typ FVČ je často používán v koncentrátorovém uspořádání, kde dochází ke zvýšení efektivity a relativnímu poklesu ceny pro úsporu plochy polovodiče FVČ. Účinnost zůstává na 25-30 % (Obr. 12).



Obr. 12 Příklad použití Ga/As přechodu ve vícevrstevném FVČ (40)

9 Cu_2O a CuS články

9.1 Cu_2O články

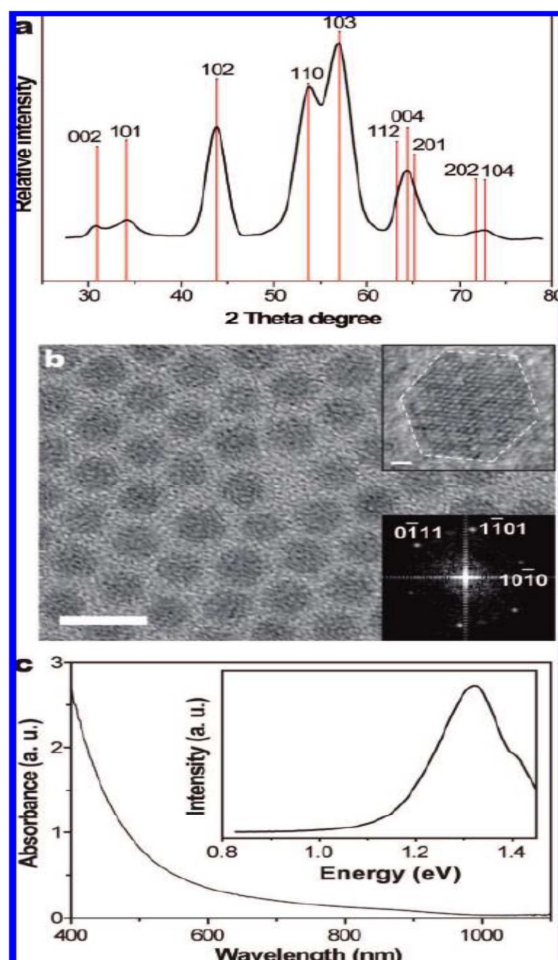
Cu_2O je stechiometrický p-polovodič a přestože jeho polovodičové vlastnosti a potenciální použitelnost pro FVČ je známa desetiletí (dlouho před Si, Ge a dalšími polovodiči) byl pro použití ve FVČ testován až od 70let. V té době totiž začaly být hledány levné materiály pro jejich výrobu. Cu_2O je ceněn především pro pozemní aplikace pro jeho netoxičnost, a levnou výrobu (dostatek suroviny a jednoduchou výrobu). Má vhodný zakázaný pás v oblasti 2 eV, a teoretickou účinnost 12 % (40). Prakticky ovšem bylo dosud dosaženo v 70letech i recentně pouze účinnosti přibližně 2% (41).

Poměrně dlouho se nedařilo připravit n-typ Cu_2O , a tak byl FVČ na bázi homopřechodu připraven až po roce 2000. Nejlepší výsledky byly publikovány s přechodem Cu/ Cu_2O . Články založené na heteropřechodu byly připraveny depozicí n-typ polovodiče s vhodným zakázaným pásem na Cu_2O , funkční články byly popsány například se systémy ZnO/ Cu_2O a CdO/ Cu_2O . Účinnost Cu_2O článků zůstává na hladině 1-2 %, což nedostačuje pro komerční využití. Příčinou jsou především samotné polovodičové vlastnosti. Jde zejména o vysoký odpor systému zapříčiněný absencí vhodných metod dopování Cu_2O respektive snížení koncentrace Cu v přechodu.

9.2 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ články

Cu_2S články jsou založeny na polovodičové charakteristice zakázaného pásu Cu_2S - 1,21 eV. Byly studovány zejména v letech 1960-80. Celková výkonnost těchto FVČ byla nízká, i když některé výsledky soustavy $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ byly slibné. Avšak zejména pro dlouhodobý pokles výkonnosti způsobený difuzí a dopováním Cu do CdS vrstvy vedlo k poklesu zájmu tohoto typu FV principu.

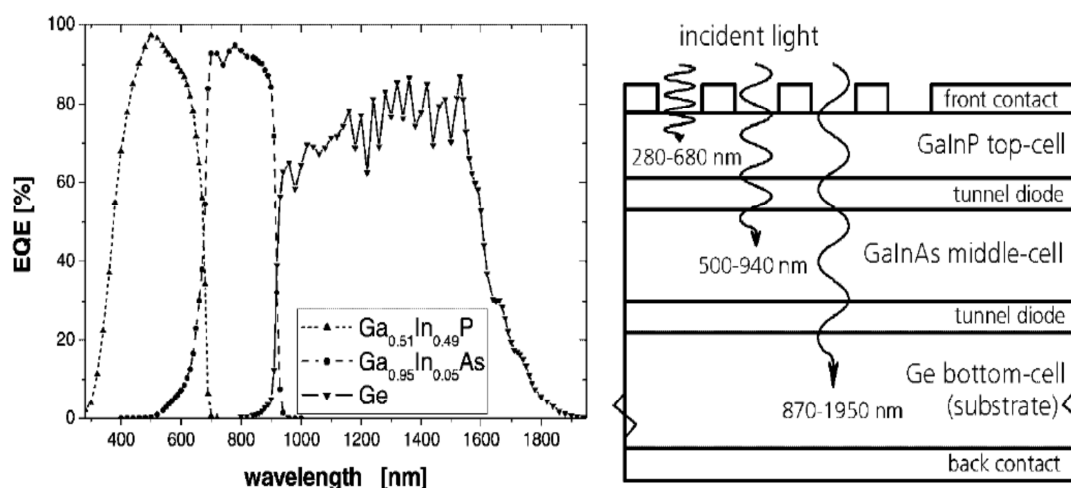
Ve spojitosti s novými technologiemi jako jsou například použití nanokrystalů je tento systém znovu přehodnocován. Použití nanokrystalických materiálů umožňuje totiž aplikaci jemnějších technologií na zpracování aktivních vrstev, čímž se mění jak difuzní, tak dopovací vlastnosti systému. Přiložený obrázek ilustruje strukturu, elektrické i optické vlastnosti testovaných FVČ na bázi CdS nanokrystalů (42). Příprava FV systému byla realizována v tekuté fázi a bylo dosaženo účinnosti vyšší než 1,6 %. Nízká výrobní teplota umožňuje vazbu na plastické nosné materiály, nutno zvažovat potenciální toxicitu CdS. Systém pracuje na laboratorní úrovni (Obr. 13).



Obr. 13 Struktura Cu_2S nanokrystalů. a) XRD difrakční vzorec Cu_2S nanokrystalů vykazující hexagonální strukturu (svíslé linie); b) TEM elektronmikroskopické snímky Cu_2S nanokrystalů s průměrem přibližně 5,4 nm (měřítko 10 nm); c) UV absorpční spektrum Cu_2S nanokrystalů se širokou absorpcí do cca 1000 nm a jedním vrcholem v 1,32 eV. (42)

10 Vícevrstvé fotovoltaické články

Vícevrstvé články patří k neúčinnějším FV systémům. Jsou tvořeny několika vrstvami polovodičových přechodů uložených na sebe. V řadě případů jsou obohaceny o další mezivrstvy se speciálním účelem. Některé systémy (např. na bázi křemíku) byly již komentovány výše. Základním principem vícevrstevných FVČ je uložení více absorpčních vrstev na sebe, přičemž směrem od vstupního okna k bázi klesá šířka zakázaného pásu – vlnová délka fotonů absorbovaného světla se prodlužuje. Tím dochází k tomu, že fotony jsou absorbovány postupně – ve svrchní vrstvě s nejkratší vlnovou délkou a potom se postupně vlnová délka absorbovaných fotonů prodlužuje (Obr. 14), (nejsvrchnější vrstva má nejširší zakázaný pás nejspodnější nejužší).

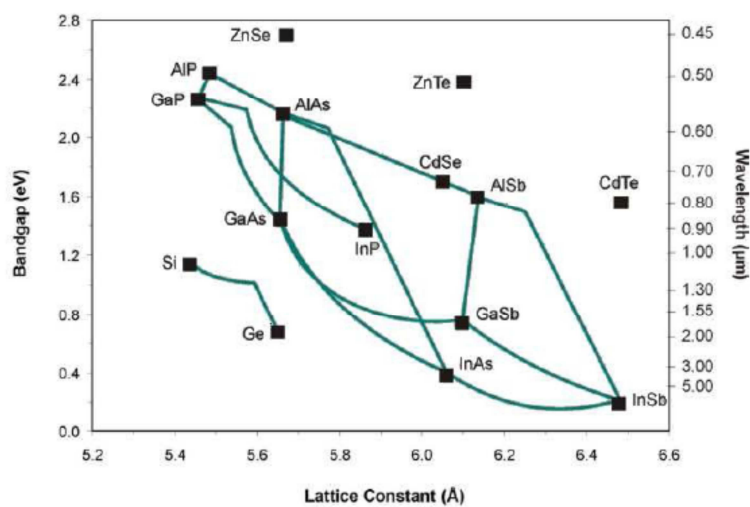


Obr. 14 Vlnová délka absorbovaného záření ve vztahu k absorpčním vrstvám ve vícevrstevném FVČ (43)

Nejlepší kandidáti pro vícevrstevné články jsou prvky III. a V. skupiny periodické soustavy. Jejich zakázaný pás je široký, existuje vysoký absorpční koeficient a mohou být připraveny ve vhodné krystalické respektive optoelektrické struktuře. Vícevrstvé články byly studovány od 60let a první panelové systémy byly vyrobeny v 80letech s účinností 16 % (44). V roce 1994 překročily US National Renewable Energy Laboratory bariéru účinnosti 30 % a v roce 2007

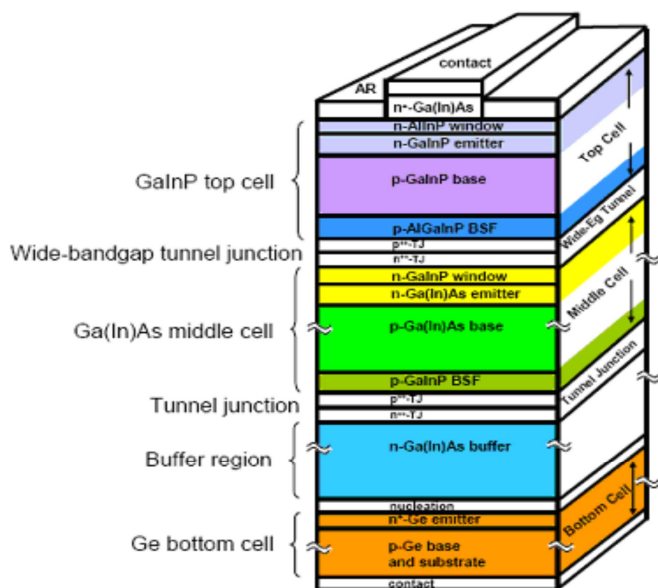
bylo dosaženo účinnosti 40,7 % přičemž teoretická účinnost přesahuje 80 % (45).

Výroba vícerstevných článků je mnohem náročnější než jednovrstevných, mimo jiné je velmi důležité uspořádání krystalických mřížek, již 0,01 % „chyb“ snižuje zdatelně elektrické charakteristiky soustavy. Vztahy mezi pozicí zakázaného pásu, absorpční vlnovou délkou a mřížkovou konstantou některých polovodičových systémů demonstuje graf (Graf 6).

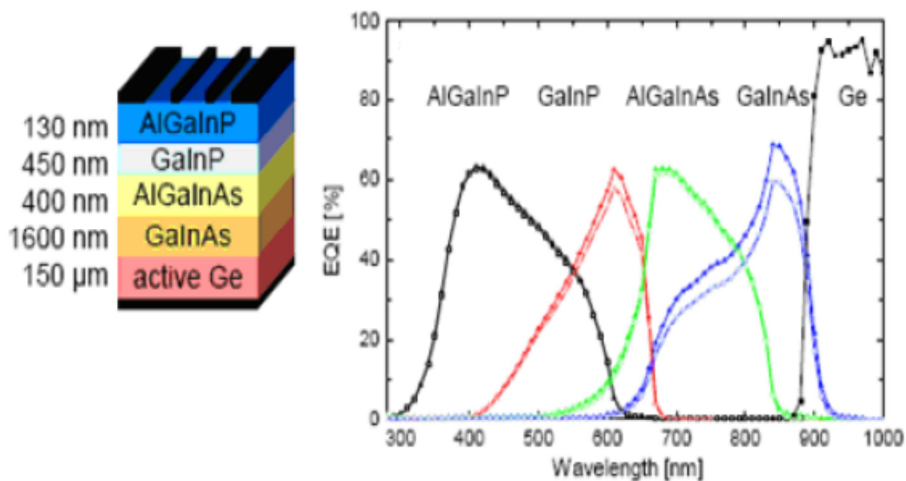


Graf 6. Vztah mezi šířkou zakázaného pásu (band gap), vlnovou délkou (wavelength) a mřížkovou konstantou (lattice constant) u některých polovodičových systémů (44)

Materiály použité při konstrukci vícerstevných článků musí být tedy vybrány s ohledem na požadovaná zakázaná pásma a mřížkové konstanty. Dále musí být určena síla každé vrstvy podle absorpčních vlastností materiálu a předpokládané frekvence fotoelektrické výměny tak, aby každá vrstva generovala stejný proud. Vícerstevné FVČ mohou být vyráběny mechanickým skládáním jednotlivých vrstev připravených odděleně, nebo jsou krystaly polovodičů deponovány na předcházející vrstvu přímo. Příklady dvou velmi efektivních systémů jsou uvedeny na obrázcích (Obr. 15, Obr. 16).



Obr. 15 Trojvrstvý FVČ na bázi GaInP (1.85 eV) pohlcující krátkovlnné spektrum, vrstvy GaAs (1.42 eV) pohlcující část spektra blízko infračervené oblasti a Ge (0.67 eV) absorbující nízkoenergetické fotony (44)



Obr. 16 Návrh možného uspořádání FVČ s efektivním absorpčním koeficientem (EQE, effective quantum efficiency) ve vztahu k vlnovým délkám absorbovaného světla (44)

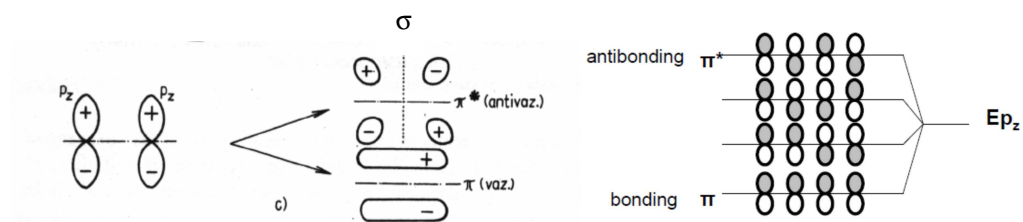
Další vývoj vícevrstevných článků pokračuje výběrem vhodnějších kombinací fotoabsorpčních materiálů, zvyšováním stability systému a jeho životnosti, optimalizací montáže do FV panelů a mnoha dalšími cestami.

11 Organické fotovoltaické články

11.1 Princip organických fotovoltaických článků

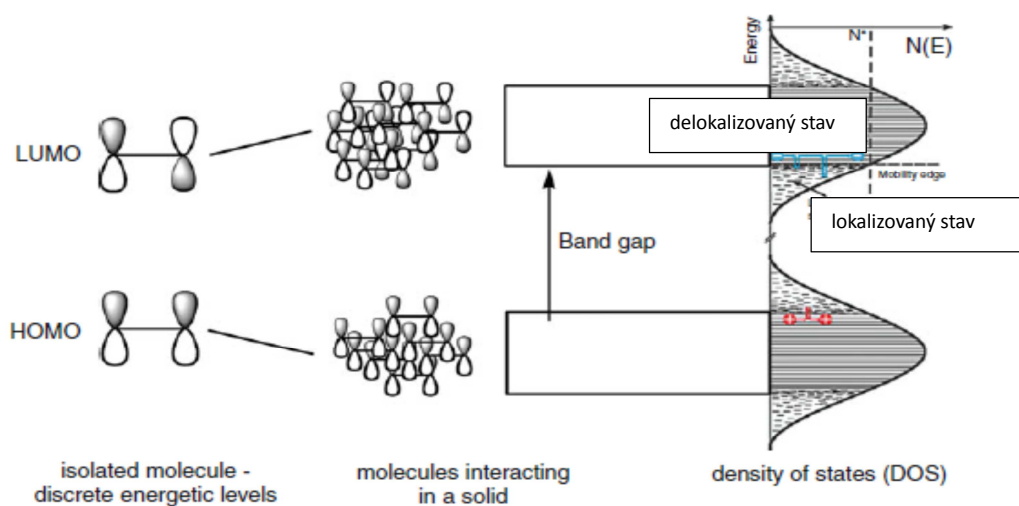
Organické FVČ jsou založeny na elektricko-vodivostních vlastnostech organických polymerů nebo malých organických molekul a jejich schopnosti absorbovat sluneční záření. Materiály pro OFVČ jsou relativně levné a nízkoteplotní způsob výroby umožňuje aplikace na ohebné materiály. Optický absorpční koeficient je dostatečný ke konstrukci efektivních FVČ. K hlavním nevýhodám proti anorganickým FVČ patří relativně nízká účinnost, nízká strukturální stabilita systému a mez pevnosti. Základním rozdílem proti anorganickým FVČ je způsob geneze elektrického proudu. Zatímco v anorganických člancích vzniká elektrický proud na základě rekombinace elektronových párů (děr) v polovodičích, OFVČ fungují prostřednictvím geneze excitonů – elektronových párů vázaných coulombovskými silami v molekule organických látek. Tyto excitony vznikají absorpcí světelných kvant a jsou posléze v souladu se základní konstrukcí OFVČ transportovány k odpovídajícím elektrodám za vzniku elektrického proudu.

Podstatou absorpce světla v organických polymerech je struktura respektive rozložení jednoduchých a dvojných vazeb v molekule uhlíkové kostry (Obr. 17).



Obr. 17 Vlevo: Schéma struktury interakce orbitalů p_z vytvářejících vazebné (π) a antivazebné (π^*) uspořádání výsledného molekulárního orbitalu v molekule etylénu (43). Vpravo: Vícenásobné uspořádání v molekule polyacetylénu (E_{p_z} energie vazby) (46)

Vazebné elektrony jsou v případě jednoduché vazby (vazba σ) lokalizovány v centru mezi uhlíkovými atomy. Další elektron v p orbitalu interaguje s párovým za vzniku π a π^* vazeb v konfiguraci HOMO a LUMO orbitalů (HOMO Highest Occupied Molecular Orbital, LUMO Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Energetický rozdíl mezi HOMO a LUMO hladinami tvoří zakázaný pás (Obr. 18) a umožňuje absorpci kvanta světla.



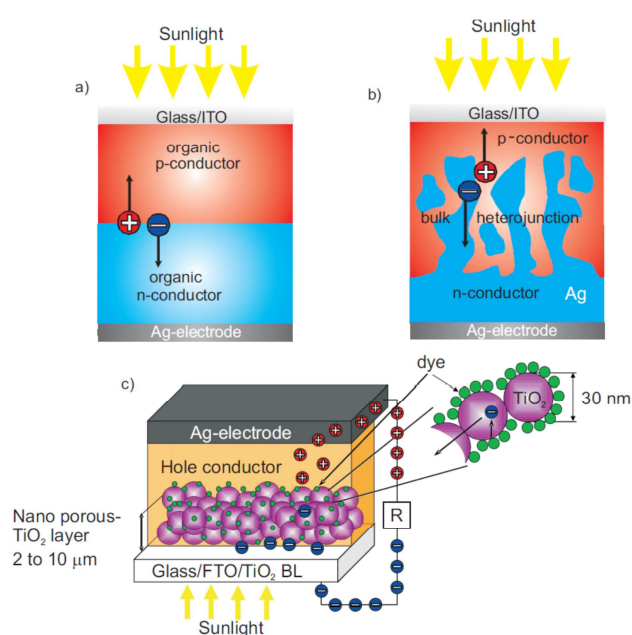
Obr. 18 Vznik zakázaného pásu (band gap) v organických materiálech (47). HOMO, LUMO: konfigurace orbitalů; Elektrický náboj + ; - ; hladina energie: energy; hustota stavu vazby: density of state; vektor náboje: N

Zakázaný pás vhodný pro OFVČ se pohybuje v rozmezí 1-4 eV. Za tmy a nízké (pokojové) teploty je přirozená koncentrace nosičů

elektronů nízká a vodivost je velmi malá. Existují organické látky, které se podle své struktury chovají jako donory nebo akceptory elektronů.

11.2 Typy organických solárních článků

Podstatou OFVČ jsou dvě vrstvy fotoaktivních látek, které jsou umístěny mezi dvě kovové elektrody (jedna z nich je průhledná). OFVČ jsou rozvíjeny na principech, které byly odhaleny v 50 a 60 letech a jsou velmi intenzivně studovány. V následujícím přehledu jsou uvedeny pouze hlavní typy nejúspěšnějších přístupů k tomuto problému: 1) dvojvrstvé OFVČ (double-layer solar cells), 2) FVČ na bázi objemového heteropřechodu (bulk-heterojunction cells) a 3) barvivem senzitivované OFVČ (dye-sensitized solar cells, DSSC). Jejich schémata jsou uvedena v následujícím obrázku (Obr. 19).



Obr. 19 Schémata některých organických fotovoltaických článků. FVČ na bázi heteropřechodu (dvojvrstvý OFVČ) (a); objemového heteropřechodu (b) a barvivem senzitivovaného OFVČ (DSSC) (c) (48)

11.3 Dvojvrstvý organický fotovoltaický článek

První pokusy o vytvoření OFVČ založeném na jedné vrstvě absorbéru vedly pouze k minimální účinnosti systému nepřevyšující 1 %. Teprve v roce 1986 Tang přišel s dvojvrstvým systémem typu pn organického polovodiče založeného na Cu-ftalocyaninu jako donoru a perylentetrakarboxylovém derivátu jako akceptoru elektronů (49). Tento článek poskytoval 1% účinnost při osvětlení 691 Wm^{-2} . Účinnost tohoto OFVČ byla zvýšena vývojem článků založených na objemovém heteropřechodu (obr. 19) (50).

11.4 Organické články založené na objemovém heteropřechodu - bulk-heterojunction BHJ FVČ

FVČ založené na objemovém heteropřechodu jsou nejvíce využívané fotoaktivní vrstvy pro výrobu OFVČ (50). Tento typ článků je v podstatě založen na předchozím dvojvrstvém modelu s tím rozdílem, že obě vrstvy vytvářející pn rozhraní jsou promíseny v celém objemu. Tím se dosáhlo jednak podstatné zvýšení plochy, kde dochází k fotoelektrické výměně a jednak je redukována difuzní doba excitonu. Uvedené změny vedou ke zvýšení účinnosti BHJ FVČ. Uvedená výhoda je ovšem vyvážena vyšší náročností na morfologickou strukturu článku, která se odráží jak v komplikovanější technologii výroby (vyšší cena), tak v menší fyzikálně-chemické stabilitě během provozu (rychlejší pokles výkonnosti). Hlavní příčiny ztrát u BHJ FVČ jsou ztráty optické a ztráty vyplývající z rekombinace a omezeného transportu excitonů k elektrodám.

Uvedené nedostatky jsou v posledních letech poměrně úspěšně odstraňovány, což vede ke zvýšení účinnosti - např. v roce 2001 bylo dosaženo účinnosti 2,5 % (51) a v roce 2011 větší než 10 % (52). Významným zlepšením se ukázalo použití ZnO nebo TiO₂ na katodové elektrodě. S růstem účinnosti koreluje například klesající cena elektřiny vyrobené z tohoto typu FVČ - poklesla z $0,5 \text{ €} \cdot \text{kWh}^{-1}$ v roce 2007 na $0,25 \text{ €} \cdot \text{kWh}^{-1}$ v roce 2011 (53). Nehledě na vylepšení

nejsou v současnosti tyto články pro elektrárenské aplikace schopné konkurence v porovnání s anorganickými.

11.5 Barvivem senzitivované organické fotovoltaické články - dye-sensitized FVČ, DSSC

DSSC organické fotovoltaické články jsou moderní zařízení založené na absorpci světla fotoabsorbující barvou s následnou chemickou cestou oddělení elektrického náboje. Jejich velkou výhodou je nízká cena, schopnost pracovat i při nízké intenzitě světla a poměrně dobrá účinnost i při vyšších teplotách. Zpočátku měly jen nízkou účinnost, podstatného vylepšení bylo dosaženo Grätzelem a spolupracovníky, když byla mezivrstva mezi anorganickým akceptorem a organickým donorem vyplněna nanopórním TiO_2 . Účinnost postupně dosáhla přibližně 10 % (54). Podle tohoto autora je často tento typ článků nazýván Grätzelovy.

DSSC je složen ze dvou elektrod, z nichž ta průhledná je pokryta vrstvou TiO_2 nebo SnO_2 . Porézní TiO_2 je pokryt vrstvou fotosenzitivního barviva, která zajišťuje absorpci světla respektive elektronů (například ruteniové barvivo). Elektrony dále jsou předány do vodivé vrstvy TiO_2 a posléze do sběrné elektrody (Obr. 19). Vysoká účinnost tohoto systému je dosažena jednak tím, že nanopórní materiál zajišťuje mimořádné zvýšení výměnné plochy mezi barvivem a polovodičem a jednak, že molekuly barvy jsou adsorbovány přímo na n-typ polovodiče. Z výrobního hlediska představuje ovšem elektrolyt komplikaci, a tak jsou testovány možnosti jak nahradit tekuté pracovní prostředí článku pevným nosičem děr.

Jinou variantou pevných OFVČ je kombinace polymerního nebo organického polovodiče, který by měl jak funkci absorpce světla, tak transportu náboje (díry), a to v jednom prostředí. Byl by tak schopen

fungovat jako barvivo i polovodičový prvek najednou. Na tomto úkolu se intenzivně pracuje (54).

Dá se říci, že vývoj OFVČ je teprve v začátcích. Kromě výše uvedených principiálních a technologických problémů je zapotřebí vylepšit další parametry. Organické články jsou náchylné k degradaci vlhkostí i vzdušným kyslíkem. Materiál musí být dále stabilní jak po stránce odolnosti vůči světelnému záření, tak vůči degradaci nanopórní struktury. Dále je z výše popsaného principu zřejmé, že účinnost článků závisí na energetickém rozdílu HOMO a LUMO (donor a akceptor) orbitalů, přičemž u polymer/fullerenové konstrukce činí ztráty elektronovým transferem 0,4-0,8 eV (55). Je pravděpodobné, že úpravami by bylo možno získat napětí naprázdno nad 1 eV. Dále se pracuje na zvýšení absorpční kapacity OFVČ. Toho je možno dosáhnout zesílením vrstvy absorbéru (za předpokladu použití materiálů, které nezvýší současně spontánní rekombinaci). Z hlediska absorpčního spektra je zřejmé, že současné OFVČ využívají především spektrum o vlnové délce 650 nm a kratší, přičemž maximální intenzity dosahuje sluneční záření v oblasti 700 nm a nižší. Proto se intenzivně pracuje na systémech, které by tyto podmínky zajistily.

12 Porovnání nejběžnějších typů FVČ

Pro srovnání jednotlivých typů FVČ lze použít různá kritéria: princip fotoelektrické přeměny, účinnost, cena, struktura FVČ, požadovaná aplikace (domácí, velkokapacitní, vesmírná, drobná elektronika, výzkumná) a mnohá další. Pro účely této práce byla vybrána převážně praktická kritéria se zaměřením na některé významné vlastnosti. Pro výčet byly použity informace již dříve uvedené v textu a dále některé přehledné práce: (53) (56), (57), (58), (59), (60). Rozdělení jednotlivých argumentů na výhodné a nevýhodné je

relativní, neboť jistý parametr může být někdy výhodou, jindy nevýhodou.

Křemíkové FVČ.

Křemíkové FVČ jsou na trhu bezpochyby nejdůležitější anorganické články. Mají dominantní podíl na výrobě elektřiny (85-90 % produkce) a nejlepší poměr cena/výkon/stabilita ze všech FVČ na trhu. Vykazují nejlepší stabilitu v elektrárenských instalacích, pro které se hodí nejlépe. Výhledově se i nadále předpokládá jejich velký význam a 50% podíl na trhu v roce 2020.

Polykrystalické křemíkové FVČ mají mírně nižší účinnost než monokrystalické (15-17 %) při současném nejlepším poměru cena/výkon z křemíkových FVČ. Proti monokrystalickým jsou levnější a mají poněkud vyšší odolnost vůči radiaci. Z toho vyplývá nízký přibližně 2% roční pokles účinnosti.

Monokrystalické křemíkové FVČ mají ve srovnání s polykrystalickými vyšší účinnost (14-20 %). Lze předpokládat trend dalšího mírného navýšení (23 %). Jsou citlivější na ztrátu optických vlastností a z ní vyplývající poněkud větší pokles účinnosti (než u polykrystalických). Mírně nižší schopnost absorpce difuzního záření a naopak lepší absorpce přímého záření upřednostňuje tyto články pro použití v oblastech s intenzivním slunečním zářením. Oproti polykrystalickým mají mírně vyšší cenu.

Amorfní křemíkové jednovrstvé FVČ jsou nejlevnější z křemíkových FVČ, což je dáno nízkou výrobní spotřebou křemíku i energie. Mají nižší účinnost (5-8 %), která postupně ještě dále poněkud rychleji klesá (proti výše uvedeným křemíkovým FVČ). Jejich nízká cena spolu s možností výroby v tenkých vrstvách (ohebné FVČ) zvyšuje jejich konkurenceschopnost.

Tenkovrstvé - vícevrstvé FVČ (zahrnují křemíkové amorfní a mikrokystalické a další – CdTe, CIGS ...) jsou používány v mnoha

aplikacích. K jejich výhodám patří zejména nízká výrobní spotřeba polovodičových materiálů a tomu odpovídající relativně nižší cena. Cenu je ovšem nutno chápat v relaci k jedné vrstvě, neboť tento typ FVČ se vyrábí v mnoha variantách včetně vícevrstvých.

O tenkovrstvých respektive vícevrstvých křemíkových FVČ platí výše řečené – mají relativně nižší účinnost (10-14 %), současně nižší cenu díky nízké spotřebě výchozího materiálu. Odolnost vůči krátkovlnnému záření bývá většinou uspokojivá, podobně jako úroveň výrobního technologického zpracování.

Pro ostatní tenkovrstvé články lze všeobecně říci, že ve výše uvedených parametrech mají podobné vlastnosti. Jejich výhodou je mimo jiné také snadná stavební aplikovatelnost, protože jsou lehké a mají zajímavý vzhled. V exteriéru poskytují dobrý výkon při dobré odolnosti vůči přehřátí. Složitější vícevrstvé systémy jsou dosud drahé a mohou být náchylné k poklesu výkonu v průběhu času. Rozhodně jsou perspektivní pro další vývoj, neboť recentně laboratorně vyrobené FVČ již vykazují účinnost 30-40 % i více. Teoretická hranice účinnosti je až 80 %.

CdTe články mají uspokojivou účinnost 7-12 % (až 16 %) při relativně dobrém poměru cena/efektivita. Z hlediska výrobní produkce jsou nejdůležitější z nekřemíkových FVČ. Při výrobě elektrického proudu mají nejrychlejší finanční návratnost z FVČ (60). Jejich výroba málo zatěžuje životní prostředí (díky nízké energetické náročnosti). Je nutno respektovat toxicitu Cd. V každém případě jsou perspektivní pro výrobu i další vývoji.

CIGS mají v některých ohledech podobné praktické vlastnosti jako výše uvedené. Jejich účinnost je dobrá - 12-14 % v plošných instalacích, v menších produkcích i 20 %. V terénu mají dobrou stabilitu, jejich cena je poněkud vyšší než u CdTe FVČ. Proti nim mají ale vysokou radiační odolnost. Lze je snadno nanášet na ohebné

podklady, což rozšiřuje možnosti použití. Jsou perspektivní pro praktické aplikace i další vývoj.

GaAs články jsou drahé, ale účinné FV systémy. Jejich význam spočívá především v menších a speciálních aplikacích (elektronika, kosmický výzkum ...). Dále je GaAs přechod součástí mnoha vícevrstvých FV systémů u kterých se podílí na dalším zvýšení účinnosti (běžná účinnost je 25-30 %). Oceňována je mimo jiné vysoká absorpční kapacita i teplotní odolnost (použití v koncentrátorových FVČ). Nutno vzít v úvahu toxicitu arzenu.

Cu₂O a CuS články jsou okrajovou oblastí. Mají nízkou účinnost 1-2 % a jsou zajímavé z experimentálního hlediska vzhledem k nízké ceně výchozí suroviny.

Organické FVČ (kromě DSSC) jsou dosud málo probádanou oblastí. Jsou příznivé pro životní prostředí (relativní netoxičnost, nízká energetická spotřeba při výrobě), mohou být aplikovány na ohebné podklady. Jejich účinnost je až na výjimky nízká. Dále mají všeobecně nízkou strukturální stabilitu a mez pevnosti a z toho vyplývající pokles účinnosti s časem. Jsou ovšem lehké a mohou být vyrobeny jako semitransparentní, což zvyšuje jejich použitelnost v atraktivních oblastech návrhářství oděvního i stavebního. Náklady na výrobu jsou výrazně nižší, než u anorganických FVČ, lze je vyrábět technologiemi tisku. Díky uvedenému mají krátkou finanční návratnost. Některé z OFVČ se již svými parametry posunuly k hranici širšího využití.

Například **OFVČ na bázi objemového heteropřechodu** mají již běžně 10% účinnost. Pro dosažení plné konkurenceschopnosti ve velkých aplikacích bude ale muset být dále navýšena. BHI články jsou použitelné pro malé zdroje bateriového typu, pro elektroniku a malé ostrovní aplikace (dobití mobilního telefonu ...). Za současného stavu je možno očekávat zvýšení účinnosti do 15 % z jednovrstvého článku. Další zvyšování účinnosti k hranici 20 %,

kteřá je dána Shockley-Quesnierořým limitem pro jednorořtvý článeř, by siĉe BHJ FVČ udělalo konkurenceschopnými s anorganickými, což je ořšem podmíněno podstatným vylepšením systému. K tomu není dosud experimentální podklad (53). BHJ články jsou perspektivní technologií, kteřá může v budoucnosti hrát na trhu významnou roli.

Barvivoř senzitivované (DSSC) FVČ jsou druhou prakticky využitelnou skupinou OFVČ. Jejich výhodou je relativně dobrá účinnost (10,9 %, 2011), nízká cena výchozích materiálů a snadná výroba. Z fyzikálního hlediska jsou jednoduchou alternativou do vhodných již existujících terénních aplikací. Mají schopnost „pracovat“ za nízkých hladin osvětlení a neztrácí účinnost ani při vysokém osvětlení a vyšších teplotách. Jsou velmi perspektivní pro další vývoj.

Pro relativně nízkou účinnost nejsou konkurenceschopné s křemíkovými FVČ v elektrárenských aplikacích. Podléhají rychlejší ztrátě účinnosti vlivem UV záření, což vede k omezení životnosti a ztrátě elektrického výkonu. Tekutý elektrolytový systém je náchylný k fyzikálním změnám, což vede k mechanickému poškození (zamrzá, dilatuje při vysokých teplotách). V konstrukci použitá organická rozpouštědla mohou vytvářet ekologické problémy. Mají horší účinnost v červené části spektra.

13 Závěr

Pokud nebudou objeveny kvalitativně nové přístupy pro výrobu elektrické energie, bude fotovoltaika hrát celosvětově stále významnější roli v energetice, zpracovatelském průmyslu i výzkumu. Zlepšení konkurenceschopnosti fotovoltaické výroby elektřiny lze dosáhnout mnoha způsoby. Patří k nim například zvýšení účinnosti křemíkových FVČ první generace („wafer-based“) anebo zvýšení účinnosti FVČ třetí generace při zachování současných výrobních nákladů. Jinou možností je rozvíjet levné účinné FVČ (tenkovrstvé články respektive FVČ druhé generace). Z tohoto pohledu se jeví křemíkové „wafer-based“ a CdTe FVČ jako nejperspektivnější.

Úplný elektrárenský FV systém má tři hlavní investiční oblasti: 1) FV modul, 2) instalační/fixační systém a 3) síťové připojení (inverter). Protože cena instalace a přípojné elektroniky je pro všechny typy FVČ srovnatelná, je cena modulů a jejich účinnost základním parametrem pro efektivitu zařízení. Křemíkové FVČ tvoří základ pro elektrárenské použití. Zařízení s vyšší účinností jsou vhodná zejména pro omezenou instalační plochu (např. střechy). Lehká a ohebná zařízení mají uplatnění ve speciálních aplikacích, jako jsou mobilní ostrovní zařízení (táboření, armáda). Vysokoúčinné a drahé FVČ resp. panely mají uplatnění např. v elektronice, kosmickém výzkumu apod. Lze očekávat, že se fotovoltaika, nebo alespoň její některé aplikace stanou trvalou součástí našeho života.

14 Literatura

1. **Hambálek I.** *Vývoj emise skleníkový plynů v Evropě.* Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Přírodovědecká fakulta. Olomouc. [Online] 2009. [Citace: 19. 3 2014.] Dostupné z: http://geography.upol.cz/soubory/studium/bp/2010-rg/2010_Hambalek.pdf.
2. **Libra M, Poulek V.** *Fotovoltaika.* Praha : ILSA, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.
3. **Neudán.** *Sbírka řešených příkladů z fyziky.* Gymnázium Karviná. [Online] 2001. [Citace: 19. 3 2014.] Dostupné z: <http://www.sbirkaprikladu.cz/userfiles/11/file/h7.pdf>.
4. **Chmel, L.** *Fotovoltaika a fototermika.* www.sspbrno.cz. [Online] 2012. [Citace: 24. 2 2014.] Dostupné z: http://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/7472/mod_resource/content/1/d%C3%AD%201%20-%207-101%20str%20u%C4%8D.pdf.
5. **Sedlák B, Štoll I.** *Elektřina a magnetismus.* Praha. Academia. 2002. ISBN 80-200-1004-1.
6. **Neudán.** *Preventivní opatření pro správnou funkci plynových ražení II.* TZBinfo. [Online] [Citace: 19. 3 2014.] Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/vytapime-plynem/5802-preventivni-opatreni-pro-spravnou-funkci-plynovych-zarizeni-ii>.
7. **Libra M, Štěrba J, Bláhová I.** *Fyzikální podstata světla.* Světlo. [Online] 2001. [Citace: 19. 3 2014.] Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22854.
8. **Vaňočík J.** *Malý fotovoltaický systém.* Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojího inženýrství. Brno. [Online] 2011. [Citace: 19. 3 2014.] Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1162/Bakalarska_prace_final.pdf?sequence=1.
9. **Neudán.** *Přeměna sluneční energie v energii elektrickou.* Fyzikální ústav AVCR. Praha.[Online] [Citace: 26. 2 2014.] Dostupné Z: <http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou#funkce>.
10. **Neudán.** *Fotovoltaika.* Petra Energy. [Online] [Citace: 31. 3 2014.] Dostupné z: <http://www.petraenergy.cz/fotovoltaika.html>.
11. **Neudán.** *Porovnání AV charakteristik různých typů fotovoltaických článků.* MLAB. Katedra elektrotechnologie K13113. [Online] [Citace: 19. 3 2014.] Dostupné z: http://www.mlab.cz/WebSVN/filedetails.php?repname=svnaklik&path=%2Fdokumenty%2Fskolni%2FEZF%2FFotovoltaicke_clanky%2Fmereni%2Fzadani.pdf&sc=1.
12. **Střípek, M.** *Simulace zapojení solárních článků v programu MATLAB.* Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Brno. [Online] 2012. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13948/Martin_Stripek.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
13. **Neudán.** *Fyzmatik.pise.* [Online] [Citace: 28. 2 2014.] Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/303-vyvoj-ucinnosti-fotovoltaickych-panelu.html>.
14. **Neudán.** *World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency.* Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. [Online] 2013. [Citace: 20. 3 2014.] Dostupné z: http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/world-record-solar-cell-with-44.7-efficiency?set_language=en.
15. **Neudán.** *Fotovoltaické články - historie a současné trendy vývoje.* ASB portál. [Online] [Citace: 31. 3 2014.] Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-asocasne-trendy-vyvoje>.
16. **Benda, V.** *Fotovoltaické články.* [Online] [Citace: 28. 2 2014.] Dostupné z: <http://www.votum.cz/pdf/workshop/Benda%20-%20fotovoltaicke%20clanky.pdf>.
17. **Quassch Ning, Volker J.** *Obnovitelné zdroje energií.* Praha : GRADA Publishing, 2008. str. 296. ISBN 978-80-247-3250-3.
18. **Olejníček, J.** *Vzdělávání výzkumných pracovníků.* Fyzikální ústav AVČR. [Online] [Citace: 28. 2 2014.] Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/seminare/2011-01-28_Olejnicek_prezentace.pdf.
19. **Neudán.** *Fotovoltaika pro každého.* Czech RC agency. [Online] [Citace: 13. 3 2014.] Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#prvni>.
20. **Miles RW, Zoppi G, Forbes I.** *Inorganic photovoltaic cells.* Materials Today. 2007, Sv. 10, stránky 21-27.
21. **Gorai P, et al.** *Solar Photovoltaics.* [Online] [Citace: 21. 3 2014.] Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.che.iitm.ac.in%2F~sjayanti%2Fpresentations%2Fphoto.ppt&ei=~8ltU-0Extm0BvTLgNgl&usq=AFQjCNEDXzmeMnrvedCPn7PgD4YRCW9Qw&bvm=bv.62922401,d.Yms&cad=rjt>.
22. **Rappaport P.** *The photovoltaic effect and its' utilisation.* RCA Rev. 1959, Sv. 20, stránky 373-397.
23. **Mitchell K, Fahrenbruch AL, Bube RH.** *Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe.* J. Appl. Phys. 1977, Sv. 48, stránky 829-830.
24. **Mah, O.** *Fundamentals of photovoltaic materials.* [Online] 21. 12 1998. [Citace: 25. 2 2014.] Dostupné z: <https://www.google.cz/search?q=fundamentals+of+photovoltaic+materials+national+solar+power+research+in>

stitute+inc&oq=Fundamentals+of+Photovoltaic+Materials&aqs=chrome.2.69i57j0l2.10988j0j7&sourceid=chrome&espv=210&es_sm=93&ie=UTF-8.

25. **Mathew X et al.** *CdTe/CdS solar cells on flexible substrates*. Solar Energy. 2004, Sv. 77, stránky 831–838.
26. **Khrypunova G et al.** *Recent developments in evaporated CdTe*. Solar Energy Materials & Solar Cells. 2006, Sv. 90, stránky 664-677.
27. **Romeo N. et al.** *Growth of polycrystalline CdS and CdTe thin layers for high efficiency thin film solar cells*. Materials Chemistry and Physics. 2000, Sv. 66, stránky 201-206.
28. **Tiwari AN et al.** **Photovoltaics: CdTe solar cell in a novel configuration**. Progress in Photovoltaics. 2004, Sv. 12, stránky 33-38.
29. **Jinqing Peng, Lin Lu.** *Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, Sv. 19, stránky 255–274.
30. **Phillips JE et al.** *Polycrystalline Heterojunction Solar Cells: A Device Perspective*. Phys. stat. sol. 1996, Sv. 194, stránky 31-39.
31. **Contreras MA et al.** *Progress toward 20% efficiency in Cu(In,Ga)Se₂*. Progress in Photovoltaic Research and Application. 1999, Sv. 7, stránky 311-316.
32. **Hahn H et al.** *Über einige ternäre chelkogenide mit Chalkopyritstruktur*. Z. Anorg. Allg. Chem. 271, 153–170 (1953). 1953, stránky 153–170.
33. **Tell B, Shay J, Kasper H J.** *Room-temperature electrical properties of ten of I-III-VI₂ semiconductor materials*. J. Appl. Phys. 1972, Sv. 49, stránky 2469-2470.
34. **Rau U, Schock H.** *Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells – recent achievements, current*. Appl. Phys. 1999, Sv. A 69, stránky 131–147.
35. **Mickelsen R, Chen W.** *Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.* 1982. stránky 781-785.
36. 介绍了铜铟镓硒薄膜太阳能电池的性能与结构. *Development of Cu(InGa)Se₂ (CIGS) Thin Film Solar Cells*. [Online] 2011. Dostupné z: <http://www.siat.cas.cn/xscbw/xsqk/201109/W020110913360381852247.pdf>. 8.
37. **Miles RW, Hynes KM, Forbes I.** *Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues*. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 2005, Sv. 51, stránky 1-42.
38. **Neudán.** *Gallium arsenide solar cells*. Appropedia. [Online] [Citace: 31. 3 2014.] Dostupné z: http://www.appropedia.org/Gallium_arsenide_solar_cells#Introduction-Gallium_Arsenide_and_the_Solar_Cell.
39. **Singh VK, Giribabu L.** *Photovoltaic-A Review of the Solar Cell Generation*. Academia.edu. [Online] [Citace: 31. 3. 2014.] Dostupné z: http://www.academia.edu/3838303/Photovoltaic-A_Review_of_the_solar_cell_Generation.
40. **Abdu Y, Musa AO.** *Copper Oxide (Cu₂O) Based Solar Cells a Review*. Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. 2009, Sv. 2, stránky 8-12.
41. **Mittiga A et al.** *Heterojunction Solar Cell with 2% Efficiency based on a Cu₂O Substrate*. Applied physics letters. 2006, Sv. 88, stránky 502-1 - 502-2.
42. **Yue Wu, et al.** *Synthesis and Photovoltaic Application of Copper (I) Sulfide Nanocrystals*. Nano Letters. 2008, Sv. 8, stránky 2251-2255.
43. **Cherucheril G, March S, Verma A.** *Multijunction Solar Cells*. [Online] 2011. [Citace: 31. 3 2014.]. Dostupné z: <http://home.eng.iastate.edu/~sdmarch/documents/332%20Paper-Final%20Draft-Cherucheril,%20March,%20Verma.pdf>.
44. **Yastrebova NV.** *High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential*. Sunlab. [Online] 2007. [Citace: 10. 3 2014.] Dostupné z: <http://sunlab.site.uottawa.ca/pdf/whitepapers/HiEfficMjSc-CurrStatus&FuturePotential.pdf>.
45. **Myong. SY.** *Recent progress in inorganic solar cells using quantum structures*. Recent Pat Nanotechnol. 2007, Sv. 1, stránky 67-73.
46. **Frey G.** *Organics and other "exotics" photovoltaics*. Weizmann Institute of Science. [Online] 2007. [Citace: 15. 3 2014.]. Dostupné z: <http://www.weizmann.ac.il/conferences/ASEO/Gitti.pdf>.
47. **Glowacki ED, Sariciftci, Tang ChW.** *Organic Solar Cells*. Johannes Kepler Universität Linz. [Online] 2012. [Citace: 15. 3 2014.]. Dostupné z: https://www.jku.at/JKU_Site/JKU/ipc/content/e166717/e166907/e174991/e199013/2012-024.pdf.
48. **Bruder I.** *Organic solar cells: Correlation between molecular structure, morphology and device performance*. Universität Stuttgart. Max-Planck-Institut für Festkörperforschung. [Online] 2010. [Citace: 15. 3 2014.]. Dostupné z: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2010/5053/pdf/Promotion_.pdf.
49. **Tang CW.** *Two-layer organic photovoltaic cell*. Appl. Phys. Lett. 1986, Sv. 48, stránky 183-185.
50. **Hoppe H, Sariciftci NS.** *Organic solar cells: An overview*. Green River Community College Resources. [Online] 2004. [Citace: 15. 3 2014.]. Dostupné z:

<http://www.instruction.greenriver.edu/csolomon/Physics/SPRING%202013/Sacrificiti%20review%20Overview%20Sacrificiti%202004.pdf>.

51. **Shaheen NS, Brabec SE, Sariciftci CJ.** *2.5% Efficient organic plastic solar cells.*, Appl Phys Lett. 2001, Sv. 78, stránky 841–843.
52. **Service R.** *Outlook brightens for plastic solar cells.* Science. 2011, Sv. 332, str. 293.
53. **Scharber MC, Sariciftci NS.** *Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells.* Prog Polym Sci. 2013, Sv. 38, stránky 1929-1940.
54. **Gratzel M.** *Dye-sensitized solar cells.* Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2003, Sv. 4, stránky 145–153.
55. **Savenije TJ.** *Organic solar cells.* Aerospace Students. Delft University of Technology. [Online] 2014. [Citace: 18. 3 2014.] Dostupné z: <http://aerostudents.com/files/solarCells/CH8OrganicSolarCells.pdf>.
56. **Meng Tao.** *Inorganic Photovoltaic Solar Cells: Silicon and Beyond.* The Elektrochemical Society. [Online] [Citace: 21. 3 2014.] Dostupné z: https://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr08/wtr08_p30-35.pdf.
57. **Bhubaneswari Paridaa, Iniyamb S, Goicc R.** *A review of solar photovoltaic technologies.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011, Sv. 15, stránky 1625–1636.
58. **Ghazali AM, Rahman AMA.** *The Performance of Three Different Solar Panels for Solar Electricity Applying Solar Tracking Device under the Malaysian Climate.* Energy and Environment Research. 2012, Sv. 2, stránky 235-243.
59. **Branker K, Pathak MJM, Pearce JM.** *A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity.* Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2011, Sv. 15, stránky 4470-4482.
60. **Chu, Yinghao.** *Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies.* GENI, Global Energy Network Institute. [Online] 2011. [Citace: 21. 3 2014.] Dostupné z: <http://www.geni.org/globalenergy/research/review-and-comparison-of-solar-technologies/Review-and-Comparison-of-Differe>.

15 Seznam zkratek, obrázků, grafů

15.1 Seznam zkratek

| | |
|------------|--|
| BHJ: | fotovoltaické články na bázi objemového heteropřechodu |
| CuInGaSe: | měď/indium/galium selen |
| CuInSe: | měď/indium/selen |
| DSSC: | barvivem senzitivované fotovoltaické články |
| E_d : | donorová energetická hladina polovodiče |
| E_g : | energie zakázaného pásu |
| E_p : | akceptorová energetická hladina polovodiče |
| E_{pz} : | energie vazby v uhlíkovém řetězci |
| FF: | činitel plnění fotovoltaického článku |
| FVČ: | fotovoltaický článek |
| HOMO: | highest occupied molecular orbital |
| I_{sc} : | proud nakrátko fotovoltaického článku |
| ITO: | intrinsický TiO_2 |
| LUMO: | lowest unoccupied molecular orbital |
| MPP: | maximální výkon fotovoltaického článku |
| OFVČ: | organický fotovoltaický článek |
| P_{IN} : | osvětlení fotovoltaického článku |
| R_p : | paralelní odpor fotovoltaického článku |
| R_s : | sériový odpor fotovoltaického článku |
| U_{oc} : | napětí fotovoltaického článku naprázdno |

15.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření

Obr. 2 Závislost energie fotonů na vlnové délce světla

Obr. 3 Sluneční spektrum po průchodu atmosférou pod úhlem 48° od normály (tzv. spektrum AM 1,5)

Obr. 4 Schéma energetických změn po absorpci světla v polovodiči pn přechodu krystalického křemíku

Obr. 5 V-A charakteristika FVČ

Obr. 6 Schématické zobrazení FVČ

Obr. 7 Schéma fotovoltaického panelu

- Obr. 8 Schematické zobrazení křemíkových FVČ se zataveným (vlevo) a naloženým (vpravo) sběrným kontaktem
- Obr. 9 Schematické zobrazení FVČ z amorfního křemíku: jednovrstvý (A), dvojevrstvý (B) trojevrstvý (C)
- Obr. 10 Ilustrační schéma CdTe FVČ
- Obr. 11 Schéma CIGS článku
- Obr. 12 Příklad použití Ga/As přechodu ve vícevrstvném FVČ
- Obr. 13 Struktura Cu_2S nanokrystalů
- Obr. 14 Vlnová délka absorbovaného záření ve vztahu k absorpčním vrstvám ve vícevrstvném FVČ
- Obr. 15 Trojevrstvý FVČ na bázi GaInP (1.85 eV) pohlcující krátkovlnné spektrum, vrstvy GaAs (1.42 eV) pohlcující část spektra blízko infračervené oblasti a Ge (0.67 eV) absorbující nízkoenergetické fotony
- Obr. 16 Návrh možného uspořádání FVČ s efektivním absorpčním koeficientem (EQE, effective quantum efficiency) ve vztahu k vlnovým délkám absorbovaného světla
- Obr. 17 Vlevo: Schéma struktury interakce orbitalů p_z vytvářejících vazebné (π) a antivazebné (π^*) uspořádání výsledného molekulárního orbitalu v molekule etylénu. Vpravo: Vícenásobné uspořádání v molekule polyacetylénu (E_{pz} energie vazby)
- Obr. 18 Vznik zakázaného pásu (band gap) v organických materiálech
- Obr. 19 Schémata některých organických fotovoltaických článků.

15.3 Seznam grafů

Graf 1. Graf vývoje účinnosti FVČ v průběhu let (%)

Graf 2. Podíl jednotlivých typů FVČ na světovém trhu v roce 2009.

Graf 3. Porovnání účinnosti FVČ ve vztahu k šířce zakázaného pásu

Graf 4. Pokles účinnosti některých FVČ po expozici vysokoenergetickému záření

Graf 5. Schéma oboustranného CdTe FVČ s grafem účinnosti při předním a zadním osvětlení

Graf 6. Vztah mezi šířkou zakázaného pásu (band gap), vlnovou délkou (wavelength) a mřížkovou konstantou (lattice constant) u některých polovodičových systémů