

Fotovoltaika - jaká je nejlepší dostupná technologie?

Datum: 22.3.2010 | Autor: Milan Vaněček a Antonín Fejfar, Fyzikální ústav Akademie věd ČR, v.v.i., Praha | Recenzent: prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc., prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

V současném boomu instalací FV elektřiny se stává, že i do laboratoří Fyzikálního ústavu AV ČR dostaneme otázku, jaký fotovoltaický panel je nejlepší. Na takovou otázku není jednoduchá odpověď. Ideální panel by měl mít především co nejvyšší účinnost, která by nezávisela ani na teplotě, ani na intenzitě osvětlení. Kromě toho by panel nedegradoval, obešel by se bez údržby, byl co nejlehčí a přitom pevný a odolný. Takový panel zatím nikdo nevyrobil (a to bez ohledu na možnou cenu). Pokud není ideální volba, jaké možnosti se tedy nabízejí?

Dostupné technologie

Kritérií, na jejichž základě lze porovnávat dostupné technologie, je celá řada. Níže je uveden jen výběr nejpoužívanějších. Předem je nutno říci, že do našich klimatických podmínek se příliš nehodí fotovoltaické články s nejvyšší účinností (složené multispektrální články na bázi polovodičů III-V) pro koncentrátorové systémy. Světový rekord v účinnosti u těchto velmi drahých článků překročil hranici 40 % (viz obrázek). Koncentrátorové systémy jsou výborné pro oblast bez mraků (například pouště), v České republice by však využívaly jen asi polovinu dopadajícího slunečního záření.

Nejúčinnější komerčně dostupné panely jsou z monokrystalického křemíku od americké firmy SunPower. Jedná se o jediný typ panelů, jehož účinnost se blíží 20 % (účinnost jednotlivých monokrystalických křemíkových článků na tomto panelu je až 22 %). Jednotlivé články i celý panel jsou celé černé, veškeré kontakty jsou na zadní ploše. Panel, který by měl účinnost vztáženou na celkovou plochu 22% či více ještě nikdo nevyrobil.

Nejlepší poměr účinnost/cena mají články z multikrystalického křemíku, které jsou v současnosti na trhu nejrozšířenější. U těch již účinnost panelů v průmyslové výrobě překročila 17 %, i když typické hodnoty jsou zatím nižší (okolo 15 %). Máme-li omezenou plochu, na kterou můžeme tyto panely umístit, pak představují optimální volbu.

Čtěte také: [Odborníci rozcupovali nesmyslný návrh vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu.](#)

Nejlevnější jsou tenkovrstvé fotovoltaické panely, jejichž výrobní náklady se v současnosti dostaly pod magickou hranici 1 USD za Watt-peak. Účinnost tenkovrstvých panelů je však ve srovnání s krystalickými zhruba poloviční, v mnoha případech i hluboko pod 10 %.

Nejpomalejší degradace je u panelů vyrobených z monokrystalických článků. Naprostá většina výrobců garantuje průměrný pokles výkonu o 0,8 % ročně (u všech typů panelů). V praxi se však prokázalo, že pokles výkonu je u monokrystalických panelů nižší. Nejstarší fotovoltaické elektrárny jsou v provozu již 25 let. Účinnost křemíkových tenkovrstvých panelů rychle klesá v prvním roce života, následně se pokles účinnosti zpomaluje v podstatě na úroveň poklesu účinnosti krystalických panelů. Proto se u tenkovrstvých panelů udává tato tzv. stabilizovaná účinnost.

Nejdelší životnost dosud nemohla být určena. Jak je uvedeno v předchozím odstavci, nejstarší větší realizace jsou pouze 25 let staré. Na rozhodnutí tohoto kritéria si proto budeme muset několik desítek let počkat. Do té doby je však nutno realizovat srovnávací instalace v různých klimatických oblastech. Předpokládá se, že životnost většiny typů panelů bude podstatně vyšší.

Nejnižší teplotní koeficient výkonu je výhodný pro instalace, u nichž jsou zhoršeny možnosti chlazení panelů. Jedná se zejména o panely integrované do stavebních konstrukcí (BIPV - Building Integrated PhotoVoltaic). V tomto parametru vedou tenkovrstvé technologie (amorfni křemík), u nichž je teplotní koeficient přibližně poloviční (0,3 %/K) ve srovnání s krystalickým křemíkem (0,5 %/K).

Nejlepší energetická návratnost je u tenkovrstvých panelů, u nichž se v současnosti v podmínkách České republiky pohybuje kolem 2 let nebo méně, na jihu Evropy pak méně než 1 rok. Ale i údaj pro krystalické Si panely tzb-info.cz/.../6327-fotovoltaika-jaka-je...

se neustále snižuje, ze současných cca 3 let v našich klimatických podmínkách.

Typy tenkovrstvých článků

Historicky nejstarší jsou články z amorfního křemíku, jsou již přímé zkušenosti s jejich více než 20letým fungováním v reálných podmínkách. V poslední době i účinnost těchto velmi levných panelů stoupla z cca 5 % k 6-7 %. Další zvýšení účinnosti v průmyslové výrobě (továrny "na klíč" dodávají Oerlikon Solar a Applied Materials) nastalo s příchodem tandemových tenkovrstvých článků amorfni křemík/mikrokrystallický křemík. Zde již účinnost průmyslově vyráběných článků přesáhla 8 % a očekává se růst nad 10 %, při současném snižování ceny pod 1 USD za W_{peak} . Firma Oerlikon slibuje tento pokles ceny již během roku 2010.

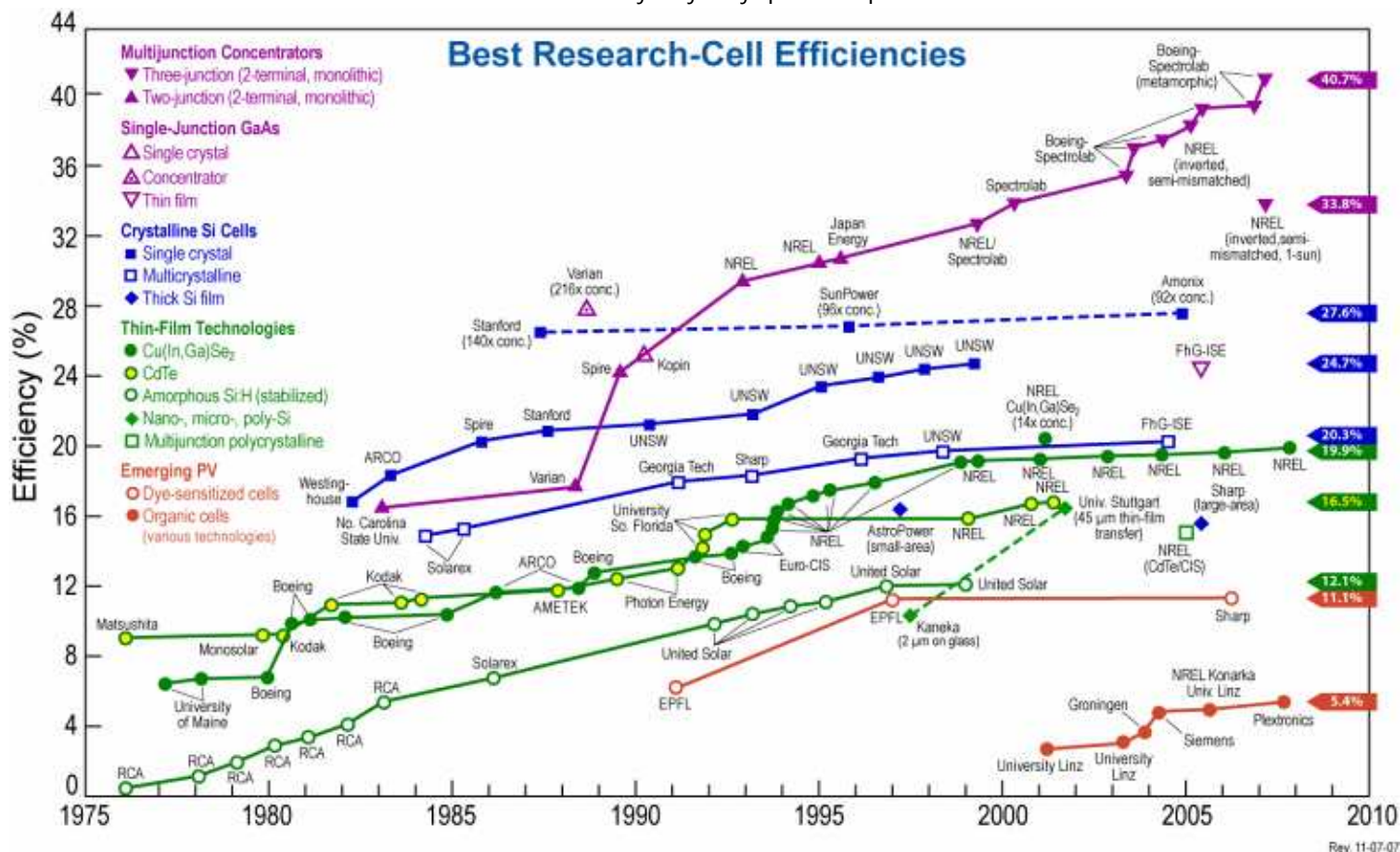
V současnosti nejúspěšnější z hlediska poměru cena/výkon jsou jedny z nejstarších fotovoltaických článků - polykrystalické články z teluridu kadmia (CdTe). Ty se již vyrábějí pod 1 USD za W_{peak} a mají účinnost v rozmezí 10-11 %. Jejich zásadním problémem však je obsah nebezpečných kovů, především kadmia, které z nich po vyřazení z provozu učiní nebezpečný odpad. Proto je v prodejní ceně článků zahrnuta i jejich kompletní recyklace (viz firma First Solar). Navíc, Evropská unie směřuje k úplnému vyloučení kadmia z elektronické výroby, dosud s jedinou výjimkou, a to jsou právě CdTe fotovoltaické články. Jejich hromadná výroba se stále rozšiřuje, ale z dlouhodobé perspektivy tyto články nemohou konkurovat článkům křemíkovým (neomezené zdroje materiálu pro výrobu křemíku, žádná toxicita).

Další články s relativně vysokou účinností okolo 20 % (v laboratoři, v poloprovozní výrobě pak okolo 10-15 %) jsou tenkovrstvé články z $CuInSe_2$, resp. z komplikovanějšího systému $CuInGaSSe$. Komplikovanost celého systému je prozatím důvodem, že ještě nenastala masová výroba těchto článků a omezené světové zásoby india možná znamenají, že k výrobě ve větším měřítku ani nedojde.

Ostatní druhy tenkovrstvých fotovoltaických článků (tak zvané "dye sensitized cells" či organické články) nejsou ještě ve skutečné hromadné výrobě a vzhledem k problémům se stabilitou není jisté, zda jejich použití nezůstane omezené na drobné aplikace.

Historický vývoj účinnosti

Dosavadní vývoj účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků je patrný z následujícího obrázku. Je však nutno podotknout, že to jsou laboratorní články o malé ploše, typicky 1 cm^2 a že je vždy prodleva několika let než se dostanou do hromadné výroby. A jako pravidlo, z důvodů co nejnižší výrobní ceny, se nikdy nedosáhlo v průmyslové výrobě takové účinnosti jako v laboratoři.



Kriteria při rozhodování

Hlavní kritérium je cena fotovoltaického panelu za Watt špičkového výkonu (W_{peak}). Zde mají tenkovrstvé technologie výhodu v nižší spotřebě materiálu (typická tloušťka vrstvy absorberu je okolo 1 mikrometru, tj. o dva řády méně než u krystalického křemíku) a v tom, že je v jednom procesu v plně automatizované výrobě vytvářen celý fotovoltaický panel, není tedy montován z jednotlivých článků. Proto je jejich energetická návratnost vynikající (i méně než 1 rok, při záruce na 20 let a životnosti ještě delší). A další propad ceny lze očekávat, až se amortizuje investice do drahého výrobního zařízení (obdobně jako tomu bylo u podobné technologie - LCD displejů).

V případě fotovoltaiky integrované v budovách (building integrated photovoltaics, BIPV), máme-li na výběr, zda použijeme řešení bez fotovoltaiky nebo s fotovoltaickou střechou či fasádou, pak bývá často výhodné použít nejlevnější tenkovrstvé fotovoltaické panely. Někdy je to jediná volba, jako na příklad u fotovoltaických střech skladištních hal, jejichž konstrukce obvykle neumožňuje instalaci těžkých zasklených panelů a místo toho se používají velmi lehké zalaminované folie amorfního křemíku (či o něco účinnější multispektrální články amorfního křemíku/amorfni slitina křemík-germanium či mikrokrytalický křemík).

Podle studie EPIA je potenciál BIPV (daný plochou která je k dispozici a průměrnou účinností panelů) v České republice či v Německu na úrovni pokrytí 30 % veškeré výroby elektrické energie a v řadě jižních zemí (Španělsko, Bulharsko) i nad 50 %. Není tedy třeba zabírat žádnou zemědělskou půdu pro dosažení vysokého podílu fotovoltaiky na výrobě elektrické energie.

Samo posuzování panelů podle účinnosti může být zavádějící, nejdůležitější je v ekonomice cena (při zachování všech předností fotovoltaiky, jako čistého zdroje energie, s vysokou energetickou návratností a nezatěžující životní prostředí ani během výroby, ani během dlouhého období generace elektřiny, ani během konečné likvidace (kompletní recyklace). Proto je ve většině instalací, kde jsme omezovali použitou plochou, nejvýhodnější krystalický či multikrystalický křemík.

Důležité je že soutěží řada zcela rozdílných technologií, v současné době dominuje multikrystalický křemík, na druhém místě je monokrystalický křemík. Tenkovrstvé technologie představují nyní nejvíce rostoucí část výroby, dosahující v současnosti cca. 15 % trhu, s očekáváním překročení 25 % během několika let.

Energetická bilance životního cyklu

(poznámka redakce)

Pro porovnávání variant technických řešení v určitém oboru je obvykle možno použít celou řadu metod. Ve všech oborech se od původních jednoduchých kritérií postupně přechází k analýze životního cyklu. S tím souvisí výrazné změny v hodnocení, co je nejlepší dostupná technologie. Hlavním kritériem již dávno přestala být cena, kromě energetické bilance, kterou zde uvažujeme, jsou v současnosti brána v úvahu i environmentální, zdravotní a sociální kritéria.

Efektivnost využití energie je možno vyhodnotit jako podíl energie získané k energii vložené. Získaná energie je vyrobená elektřina. Vložená energie je především obsažena v použitém palivu. Dále se v energetické bilanci životního cyklu uvažuje energie na výrobu zařízení, jeho údržbu a likvidaci na konci životnosti, v níže uvedeném vztahu jsou tyto položky shrnuty do "energie v zařízení".

$$\text{Efektivnost využití energie} = \frac{\text{energie získaná}}{\text{energie v palivu} + \text{energie v zařízení}}$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že například u parní turbíny vyšší účinnost znamená lepší využití energie v primárním palivu. Přitom poměr energie získané k energii vloženého paliva je vždy menší než jedna a množství energie vložené do výroby turbíny je v poměru k energii v palivu malé, na účinnost využití energie primárního paliva má zanedbatelný vliv.

V případě fotovoltaiky je situace téměř opačná. Není zde žádné palivo a energie vložená do výroby panelů je významnou položkou v energetické bilanci životního cyklu. To je rovněž důvodem, proč v analýze životního cyklu může být na rozdíl od tepelných strojů efektivnost využití energie vyšší než 1,0, neboli účinnost využití primárního zdroje vyšší než 100 %.

Zvolíme-li širší systém, můžeme v případě elektřiny uvažovat navíc ztráty při přenosu a účinnost konverze na konečný produkt. Protože fotovoltaické elektrárny jsou v průměru blíže ke spotřebě, prokazatelně snižují energetické ztráty a tím opět zvyšují využití primárních zdrojů.

Závěr

Dočkáme se v budoucnu účinnějších panelů? V případě klasické křemíkové technologie jen stěží. Je něco jiného vyrobit složitou technologickou cestou rekordní článek o ploše 1 cm², než hromadně vyrábět čtvereční kilometry plochy levných fotovoltaických článků. Avšak s nástupem nanotechnologií se přichází na nová řešení vedoucí ke zvýšené účinnosti fotovoltaických článků.

Závěrem je třeba říct, že volba fotovoltaického panelu je, stejně jako v mnoha jiných oborech, optimalizací mezi mnoha možnostmi. Z hlediska teplotního koeficientu snížení účinnosti jsou na tom nejhůře články s malou šířkou zakázaného pásu polovodiče, jako je krystalický křemík nebo CuInSe₂. Naopak lepší jsou články z amorfního křemíku nebo CdTe. Doba životnosti článku je prakticky neomezená, závisí na kvalitě zapouzdření, je ohrožena pouze elektrochemickou korozí kontaktů (vlivem vlhkosti). Nejlepším řešením je zapouzdření mezi dvěma skly s kvalitní izolací po obvodu, to však zvyšuje spotřebu materiálů a energie ve výrobě a prodlužuje dobu, za kterou panel tuto spotřebovanou energii vyrobí.

Podstatné však je, že dalším výzkumem, vývojem a hromadnou výrobou fotovoltaické panely zákonitě postupně zlevňují tak, že za 10 - 15 let již bude fotovoltaika schopná přímé konkurence s ostatními způsoby výroby elektřiny a instalované výkony budou na celosvětové úrovni ve stovkách gigawatů.

Zdroje:

Bastian Zinsser, IPE Stuttgart, srovnávací studie 14 typů FV panelů různých typů <http://us.sunpowercorp.com/>

www.solarbuzz.com/news

www.pv-tech.org

www.greentechmedia.com

www.epia.org

Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 21-25.9.2009 Hamburg

Poznámka recenzenta:

tzb-info.cz/.../6327-fotovoltaika-jaka-je...

Předložený článek popisuje v jednoduché a srozumitelné formě současný stav produkce fotovoltaických článků a modulů (s ohledem na použité zdroje je to stav v polovině roku 2009). Upřesnění některých informací by vyžadovalo podstatně podrobnější rozbor, který by přesahoval informativní rámec.

Na pozadí diskusí o efektivním využívání energie autoři ukazují, že fotovoltaika je velmi specifický obor, v němž na řadu otázek neexistují jednoznačné odpovědi. Zejména v otázce nejlepší dostupné technologie, přesněji optimální technologie, v případě fotovoltaiky nejsou základní parametry používané u jiných zařízení – účinnost a cena – pro optimální volbu dostatečné.

Velmi poučný je zejména přehledný výčet kritérií použitelných pro hodnocení optimální varianty. Zajímavým pokračováním tématu by mohl být článek, který by porovnal dostupné technologie na základě uvedených kritérií z pohledu různých zájmových skupin (výrobci, instalační firmy, investoři). Stejně tak by mohla být zajímavá multikriteriální volba optimální technologie pro konkrétní použití (na střechu, na fasádu, na zemi...).

Z hlediska efektivnosti fotovoltaických elektráren by bylo vhodné uvažovat ne pouze FV moduly (do nedávna nejdražší část systému), ale rovněž BOS (invertor, nosná konstrukce...), které se v současné době stávají limitujícím faktorem.

prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc.

Photovoltaics - what is the best available technology?

English Synopsis

The current boom of photovoltaic energy installation is such that even the laboratories of the Science Academy of the Czech Republic have been asked which is the best photovoltaic panel. There is no easy answer for such question. The ideal panel should have the highest efficiency, which should be independent of either temperature or intensity of illumination. In addition, the panel should not degrade, nor should need maintenance and should be the lightest, yet strong and durable. Thus far, nobody has built such panel (and price is not even being considered). Will we see in the future more efficient panels? Not easy with the conventional silicon technology. One thing is to build complex technology by way of a record cell of 1cm², and another, to mass produce square kilometres of low-cost photovoltaic cells. However, the advent of nanotechnology is bringing new ideas that will lead to increased efficiency of photovoltaic cells. Further research and development, together with mass production, are bound to progressively make photovoltaic panels less expensive. In 10-15 years photovoltaics will be able to directly compete with other forms of electricity production, and the installed capacity will be in the hundreds of gigawatts worldwide.