

Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů

Ing. Vladislav Poulek, CSc., Poulek Solar, s. r. o.
prof. Ing. Martin Libra, CSc., ČZU Praha,

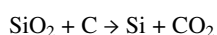
Úvod

V současnosti jsou nejvíce rozšířeny fotovoltaické (PV) panely na bázi křemíku, ať už Si-monokrystalické, polykrystalické či amorfni na bázi tenkých vrstev. Křemík má mnoho výhod. Je hojně zastoupen v zemské kůře dokonce jako jeden z nejrozšířenějších prvků. Proto je relativně levný, je snadno dostupný, není jedovatý a je nejvíce používaným a asi i nejlépe prozkoumaným polovodičem. V přírodě se vyskytuje většinou ve formě křemene neboli oxidu křemičitého (SiO_2). V této formě je mechanicky odolný a chemicky stabilní, drobná zrnka křemene tvoří všem dobře známý křemenný písek. Šířka zakázaného pásu čistého křemíku $\Delta E_G \approx 1,1$ eV rovněž vyhovuje. O fyzikální teorii polovodičů a o podstatě fotovoltaické transformace energie v polovodičových PV článcích hovořil předchozí článek [1] uveřejněný v časopise Elektro 2/2010.

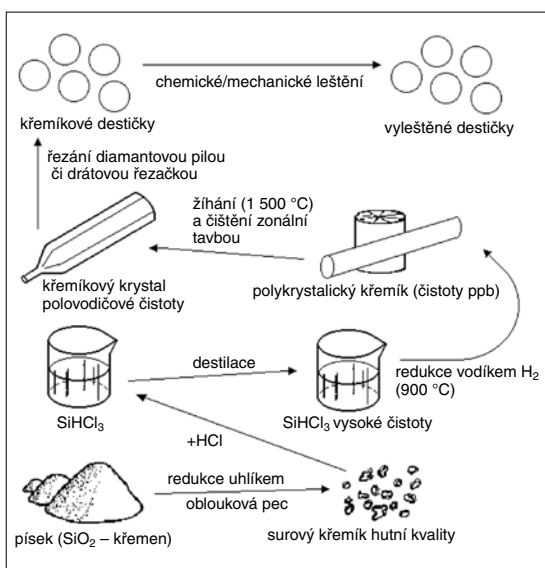
PV panely založené na jiných bázích lze rozdělit do dvou kategorií. Jedny jsou levnější, ale mají menší účinnost přeměny energie, například PV panely na bázi organických polymerních vrstev či nanovláken. Druhé mají vyšší účinnost přeměny, ale jsou mnohem dražší. Takové panely se používají většinou ke speciálním účelům, například PV panely na bázi GaAs se používají ve vesmíru. V tomto článku se dále zaměříme na PV panely na bázi křemíku, protože právě takové jsou nejrozšířenější.

Výroba křemíku

Surový křemík se vyrábí z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, kde dochází k celému řetězci chemických reakcí. Pokud započítáme pouze výchozí a konečné produkty, můžeme zjednodušeně vše vyjádřit jedinou rovnicí:



Do obloukové pece se shora kontinuálně vpravuje písek promíchaný s mletým karbonizovaným uhlím (koksem). Směrem dolů stoupá teplota a v jednotlivých úrovních probíhají chemické reakce. Dole v zóně s teplotou ca $T \approx 2\,000$ °C se hromadí roztavený



Obr. 1. Schematické znázornění postupu při výrobě Si polotovaru pro výrobu PV článků



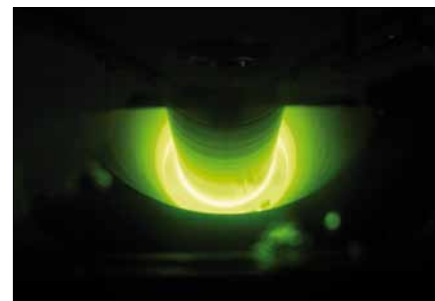
Obr. 2. Výroba křemíku v Jiaxingu (Čína)

křemík, který se v pravidelných intervalech odlévá. Takto získaný surový křemík hutní kvality má čistotu až 99 %, zhruba 1 % nečistot tvoří nejvíce příměsi Fe, Al a C. Pro použití v polovodičové výrobě je však potřebná mnohem větší čistota. Proto je třeba surový křemík vyčistit a poté vytvořit finální polotovar pro použití v další polovodičo-

vé výrobě. K tomu účelu existují různé technologie, příklad jedné z nich je schematicky znázorněn na obr. 1. Převodem na kapalnou fázi a její destilací lze získat polotovar až čistoty tzv. ppb (nečistoty řádově 10^{-9}), která je potřebná pro výrobu integrovaných obvodů. Pro výrobu PV článků běžně postačuje i nižší čistota, tzv. čistota ppm (nečistoty řádově 10^{-6}).

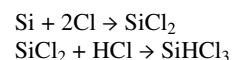


Obr. 3. Polykrystalické ingoty křemíku

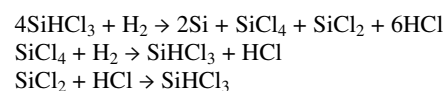


Obr. 4. Detail tažení monokrystalického ingotu v Jiaxingu (Čína)

Nejpoužívanější technologií čištění křemíku je v současnosti technologie Siemens s chlórovým cyklem. Nejprve proběhne převod na trichlórilan podle zjednodušených rovnic:



Po destilaci se z trichlórilanu opět vyredukuje čistý křemík podle zjednodušených rovnic:



Chlórový výrobní proces je náročný na spotřebu energie a na ochranu bezpečnosti



Obr. 5. Ingot monokrystalického křemíku



Obr. 6. Nařezané křemíkové destičky (vlevo polykrystalická a vpravo monokrystalická)



Obr. 7. Standardní polovodičový PV článek na bázi polykrystalického křemíku

obsluhy i životního prostředí. V současnosti se vyvíjejí nové technologie výroby čistého křemíku, které nepoužívají chlórový cyklus, a tím tyto problémy eliminují. Nyní jsou tyto technologie ve stádiu testování v poloprovozu a pokud se osvědčí, mohou podstatně snížit energetickou náročnost výroby čistého křemíku i jeho cenu. Po vyčištění obvykle vzniknou hrudky čistého křemíku. Na obr. 2 je výroba křemíku v Jiaxingu (Čína), kde jsou vidět hrudky čistého křemíku procházející kontrolou elektrického odporu. Menší rezistivita než očekávaná hodnota by naznačovala přítomnost příměsí a tedy nižší čistotu materiálu. Z tohoto polotovaru je třeba vytvořit polykrystalické či monokrystalické ingoty.

Výroba polykrystalických ingotů je jednodušší. Materiál se roztaví a nalije do formy, kde se nechá pomalu, definovanou rychlostí chladnout. Chladnutí musí být pozvolné

a řízené induktivním ohřevem, aby se vytvořila co možná největší monokrystalická zrna a aby bylo v materiálu minimum dislokací, pnutí apod. Hranice zrn i další poruchy krystalu totiž tvoří pro elektrony potenciálové bariéry a je tedy žádoucí jejich přítomnost minimalizovat. Na obr. 3 jsou polykrystalické ingoty křemíku prezentované na výstavě v Miláně 2007.

Výroba monokrystalických ingotů probíhá tzv. Czochralského metodou. Do taveniny o teplotě ca 1 415 °C se ponoří malý monokrystal jako zárodek. Ten se velmi pomalu z taveniny vytahuje a přitom se nechává otáčet kolem podélné osy. Celý proces probíhá v inertní atmosféře za sníženého tlaku. Detail tažení monokrystalického ingotu v Jiaxingu (Čína) je na obr. 4, hotový ingot prezentovaný na výstavě v Hamburku 2009 je na obr. 5.

Vzniklý polykrystalický či monokrystalický ingot se nakonec příčně řeže na destič-

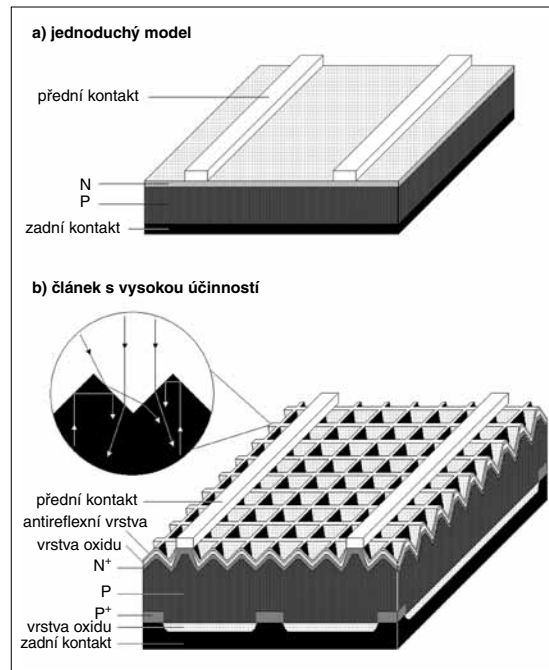
ky, které tvoří základ PV článků. V technologii řezání došlo v posledních letech k výraznému posunu kvality, zejména drátové řezačky byly podstatně vylepšeny. Zatímco dříve technologie umožňovala řezat destičky o minimální tloušťce $d = 300 \mu\text{m}$, nyní je to až $d = 100 \mu\text{m}$. Ve stejném poměru se zmenšil i prořez. Úspora křemíku, energie potřebné k jeho výrobě i zefektivnění výroby je tak evidentní. Nařezané destičky prezentované na výstavě v Hamburku 2009 jsou na obr. 6, vlevo je destička polykrystalická a vpravo monokrystalická.

Fotovoltaické články

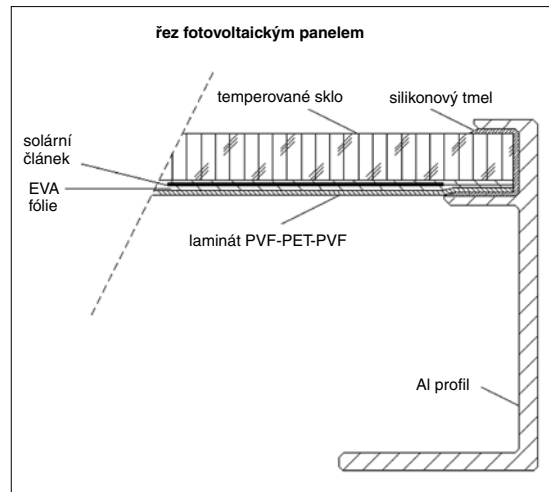
V článku [1] autoři uvedli, že PV článek je velkoplošnou polovodičovou diodou s přechodem PN orientovaným kolmo k čelní ploše. Standardní polovodičový PV článek na bázi polykrystalického křemíku je na obr. 7. Difúze příměsí donorů či akceptorů do materiálu polovodiče pro vytvoření přechodu PN probíhá v difúzních pecích. Na přední straně PV článku bývá poté vytvořena antireflexní úprava povrchu kvůli minimalizaci odrazu, aby se využilo maximum dopadajícího záření. Články s nejvyšší účinností se tedy jeví jako černé. Pouze pro určité žádané dekorativní účely se nanáší na přední stranu tenká průhledná vrstva pro zesílení odraženého záření určité vlnové délky v důsledku interference vln elektromagnetického záření na této vrstvě. Takové články v odraženém světle vykazují určitý barevný odstín.

Přední kontakt bývá vytvořen ve tvaru mřížky či hřebínku, aby zakrýval co nejmenší část plochy a aby světlo mohlo dopadat na co největší plochu článku. Zadní kontakt bývá u standardních panelů celoplošný. Kontakty se nanášejí na standardní články buď sítotiskem, nebo náročnějšími vakuovými technologiemi, například vakuovým napařováním. Pouze na speciální články určité například pro systémy s velkou koncentrací záření se dělají kontakty vnořené do materiálu polovodiče. Tak se zvětší plocha styku mezi kontaktem a polovodičem i průřez kontaktu kvůli větším proudovým hustotám, které článkem protékají.

Schéma křemíkového PV článku je na obr. 8. Na obr. 8a) je schematicky znázorněn jednoduchý model. Takto konstruovaný článek sice funguje podle výše popsaného principu, ale má nižší účinnost fotovoltaické



Obr. 8. Schéma křemíkového PV článku



Obr. 9. Schéma konstrukce PV panelu

přeměny energie hlavně v důsledku rekombinačních ztrát. Pro zvýšení účinnosti slouží u kvalitnějších článků mnoho konstrukčních zdokonalení patrných z obr. 8b). Antireflexní vrstva na přední straně minimalizuje odraz, aby maximum fotonů vniklo do PV článku a proniklo až do oblasti přechodu PN. Vrstvy nevodivého oxidu (SiO_2 – křemen) chemicky pasivují povrch a jen v určitých místech je vrstva proleptána a jen zde se odvádí elektrický náboj. Vyleptaná struktura malých jehlanů na přední straně způsobuje, že fotony snadno vstupují do PV článku. Pokud ale projdou, aniž vyvolají fotovoltaickou přeměnu, a odrazí se od zadní elektrody, nemohou na přední straně vystoupit ven z článku a jsou totálním odrazem vráceny zpět, jak je znázorněno v detailu obr. 8b). Znovu pak procházejí pře-

články používají především v kosmických aplikacích, kde cena není limitujícím parametrem, je však nezbytná maximální účinnost a odolnost proti kosmickému záření. Zde se používají především monokrystalické články na bázi InP či epitaxně připraveného GaAs/Ge. Zvláš-

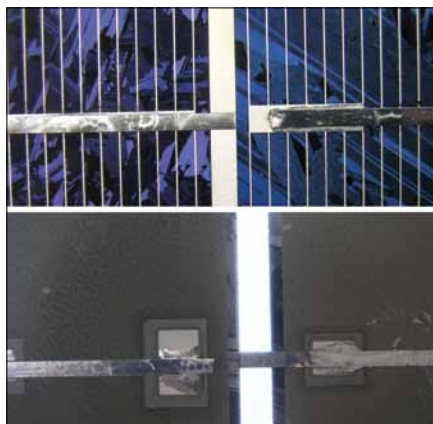


Obr. 10. Montáž PV panelů v Jiaxingu (Čína)

trů. Lze vyrobit takový PV článek s přijatelnou účinností až 15 %, ale účinnost brzy klesá a po relativně krátké době je nižší než 10 %. To znamená, že solární systém by musel zaujímat větší plochu. Cena pudy v evropských zemích je však obvykle vysoká, a proto se použití těchto článků v solárních PV systémech příliš nerozšířilo. Dobře se ale tenkovrstvové PV články uplatňují v kapesních kalkulačkách napájených elektrickou energií z fotovoltaické přeměny záření. Při malých intenzitách osvětlení totiž pracují lépe.

Fotovoltaické panely

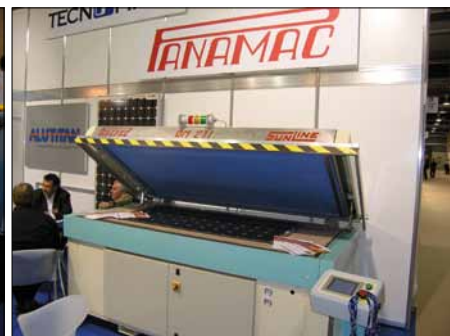
Do fotovoltaických panelů se jednotlivé články skládají v sério-parallelní kombinaci, aby při definovaném osvětlení poskytovaly žádané stejnosměrné napětí a výkon. Maximální výkon záleží především na velikosti celkové plochy PV článků, tedy na velikosti panelů. Nejběžnější konstrukce PV panelu je znázorněna schematicky v řezu na obr. 9



Obr. 11. Detail sériového propojení PV článků z přední i ze zadní strany



Obr. 12. Řezačka EVA fólie na definované rozměry (vlevo) a zařízení na zahřátí PV panelu nad teplotu tání EVA fólie (vpravo)



chodem PN a pravděpodobnost fotovoltaické přeměny energie se zvyšuje. Oboustranné PV články mají na zadní straně stejnou strukturu jako na přední straně, fotony tedy mohou dopadat současně z obou stran (na zadní stranu například po odrazu od země) a množství vyrobené elektrické energie je potom větší. Pro záření dopadající na zadní stranu je však účinnost fotovoltaické přeměny nižší, neboť fotony kratších vlnových délek jsou pohlcovány už v silnější vrstvě polovodičového substrátu a nedorazí až k přechodu PN.

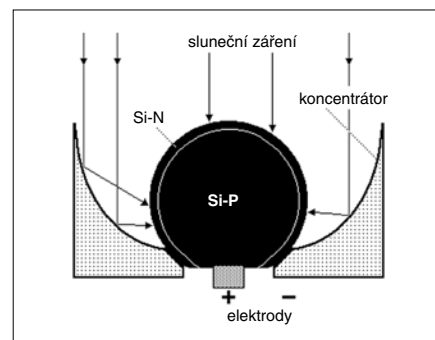
V polykrystalech hranice zrn zhoršují transportní vlastnosti polovodiče, u amorfních polovodičů je situace ještě horší. Účinnost nejvyšších PV článků na bázi monokrystalického křemíku se v současnosti pohybuje kolem 20 % u sériové výroby, účinnost některých laboratorních vzorků s výše uvedenými zdokonalujícími prvky již převyšuje 30 %. Účinnost PV článků na bázi jiných polovodičů (např. GaAs, InP) je ještě vyšší. Pohybuje se kolem 25 % u sériové výroby, avšak cena je několikanásobně vyšší. Proto se takové PV

články mají větší odolnost proti kosmickému záření a při rostoucí teplotě PV článků klesá účinnost PV přeměny mnohem pomaleji, než je tomu u jiných polovodičů. Existuje i tzv. tandemové uspořádání, kdy články na odlišné bázi jsou umístěny za sebou a každý využívá jinou oblast spektra.

Tenkovrstvové články bývají kromě křemíku např. na bázi CuInSe, CdTe či na bázi heteropřechodů mezi různými druhy polovodičů. Takové články jsou sice relativně levné, ale mají nižší účinnost kolem 10 % a navíc největším problémem bývá stabilita paramet-



Obr. 13. Oboustranný PV panel

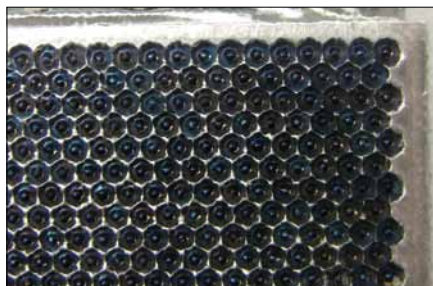


Obr. 14. Schéma PV článku na bázi propojených monokrystalických křemíkových kuliček se sférickým přechodem PN

a výrobní postup je následující: Na přední straně PV panelu je temperované (tzv. kalené) sklo. Tato skla jsou velmi odolná proti nárazu a odolají i poměrně velkým kroupám. Na sklo se pokládá plastová EVA (etylvinylacetát) fólie a na ni se skládají propojené PV články. Tato montáž v Jiaxingu (Čína) je na obr. 10. Na obr. 11 je vidět detail sériového propojení PV článků z přední i ze zadní strany, kovový pásek spojuje přední kontakt jednoho článku se zadním plošným kontaktem druhého člán-

The paper speaks about construction and production of the photovoltaic cells and panels. The production of pure silicon is described as well. Pictures from production procedure and from few exhibitions are presented.

ku. Přes propojené články se znovu pokládá plastová EVA fólie a zadní stěnu tvoří zpravidla laminátová kompozice PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Poté se vyčerpá vzduch mezi těmito vrstvami a panel se zahřeje nad teplotu tání EVA fólie. Etylvinylacetát se po teplotním zpracování rozteče a jako zalévací hmota zalije

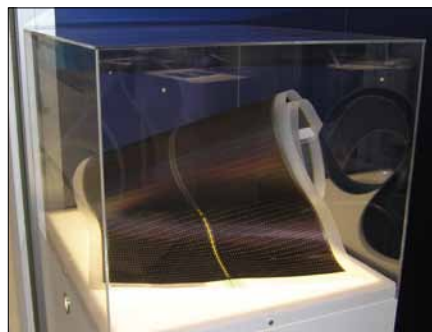


Obr. 15. Detail PV článku na bázi propojených monokrystalických křemíkových kuliček se sférickým přechodem PN

PV články v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Nakonec se panely rámuji a zatmelují silikonovým tmelem do hliníkových profilů a opatřují krabicí s výstupními kontakty. Hotové PV panely jsou tak utěsněny proti vodě či jiným nečistotám. Životnost kvalitních PV panelů na bázi krystalických polovodičů bývá 20 až 30 let. Na obr. 12 je řezačka EVA fólie na definované rozměry a zmíněné zařízení na zahřátí PV panelu nad teplotu tání fólie prezentované na výstavě ve Valencii 2008.

Nové oboustranné fotovoltaické panely (obr. 13) složené z oboustranných PV článků jsou výhodnější než dosud používané panely standardní. Přitom jejich cena se příliš neliší, u některých se dokonce vůbec neliší od ceny jednostranných panelů. Rozdíl ve výrobní technologii spočívá pouze v tom, že na zadní straně je použit průhledný laminát a zadní kontakty PV článků nejsou celoplošné, jak bylo řečeno. Panel je sice optimalizován na dopad záření z přední strany, ale účinnost fotovoltaické přeměny při dopadu záření na zadní stranu je jen o málo nižší. Navíc oboustranné (bifaciální) panely na bázi c-Si jsou v infračervené oblasti spektra transparentní pro záření s vlnovou délkou $\lambda > 100$ nm, tedy s energií fotonů menší, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu. Toto záření představuje více než 20 % energie slunečního záření a úměrně tomu se tedy v oboustranných panelech absorbuje méně energie transformované na teplo v porovnání s jednostrannými panely. Tyto panely mají proto nižší pracovní teplotu. S tím souvisí i vyšší účinnost fotovoltaické přeměny energie, což jednak plyne z teorie polovodičů, jednak to bylo i experimentálně potvrzeno [1].

Pozoruhodnou novinkou jsou panely na bázi propojených monokrystalických křemíkových kuliček se sférickým přechodem PN. Technologie je sice známá už několik let, ale teprve nedávno začala sériová výroba a komerční prodej. Mohou být jak tuhé se skleněnou čelní stranou, tak i flexibilní zapouzdřené v plastu obvykle s teflonovou čelní stranou. Kuličky křemíku o průměru ca 0,6 mm jsou uvnitř typu P a na povrchu typu N, mají tedy pod povrchem sférický přechod PN. Vyrábějí se odkapáváním taveniny dopované příměsí typu P z kapiláry, která ztuhne během volného pádu. Poté probíhá difúze a předopování povrchové vrstvy příměsí typu N. Kuličky jsou umístěny na hliníkové fólii v dírkách o menším průměru, kterými nemohou projít, v prohlubních tvořících malý parabolický koncen-



Obr. 16. Mobilní flexibilní PV panel na bázi tenkých vrstev amorfního křemíku

trátor záření. Hliníková kostra tvoří jednu zápornou elektrodu, dole je v každé kuličce část oblasti typu N odleptána a do oblasti typu P je zaveden kontakt, který tvoří druhou kladnou elektrodu. Toto uspořádání je schématicky znázorněno na obr. 14. Celý článek je zapouzdřen a z těchto článků jsou vyráběny různé velké tuhé či flexibilní panely. Ty flexibilní je možné srolovat a vzít do terénu. Výhodou je jednak skladnost, flexibilita a menší hmotnost, ale největší předností je asi sedmkrát menší potřeba křemíku v porovnání se standardními panely. Bez detailní znalosti výrobní technologie si však netroufáme posoudit, zda náročnost technologie tyto výhody nepřeváží. Navíc při šikmém osvětlení s velkým úhlem dopadu je potlačen efekt soustředění záření koncentrátorem na kuličku, což vede ke snížení účinnosti panelu. U těchto panelů by se proto zvláště dobře uplatnil sledovač Slunce a automatický pohyblivý stojan. Účinnost těchto panelů je zatím nižší, pohybuje se kolem 14 %. Konstrukční ale věří, že se časem dostanou na hodnoty účinnosti kolem 18 %, které jsou běžné u standardních panelů. Detail takového panelu firmy Spheral Solar Power prezentovaného na výstavě v Shanghai 2005 je na obr. 15.



prof. Ing. Martin Libra, CSc., vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze. Působil ve Fyzikálním ústavu AV ČR, v Tesle Holešovice, na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Nyní působí na Technické fakultě ČZU v Praze jako proděkan pro vědu a výzkum. Zabýval se fyzikou plazmatu, vakuovými technologiemi depozice tenkých vrstev, plazmovými zdroji záření a solární energií. V Jednotě českých matematiků a fyziků je předsedou komise na propagaci matematiky a fyziky. Pracuje rovněž v redakčních radách časopisů Jemná mechanika a optika a Energie kolem nás, ve vědeckých radách Technické fakulty a Provozně ekonomické fakulty, v oborové radě pro energetiku a v mnoha odborných komisích.



Ing. Vladislav Poulek, CSc., vystudoval Fakultu elektrotechnickou ČVUT v Praze. Působil ve Fyzikálním ústavu AV ČR, v roce 1992/93 získal jednoroční post-doc. stipendium na Limburgs University Centre (L.U.C.) v Belgii. Zabýval se fyzikou plazmatu, vakuovými technologiemi depozice tenkých vrstev a solární energií, zejména vývojem zařízení pro sledování Slunce. V r. 1994 založil firmu na vývoj, výrobu a instalaci solárních fotovoltaických systémů, kterou od té doby řídí.

Ukázka mobilních flexibilních panelů na bázi tenkých vrstev křemíku na výstavě v Hamburku 2009 je na obr. 16.

Závěr

Závěr

V roce 2009 světová výroba fotovoltaických panelů dosáhla hodnoty 12 000 MWp celkového maximálního výkonu. Tyto panely však bude třeba likvidovat poté, co doslouží. Už nyní se proto vyvíjí technologie likvidace PV panelů [2]. V současné době rychle nabývá na významu čínská produkce. Její podíl se významně zvyšuje a vše nasvědčuje tomu, že tento trend bude pokračovat. Panely jsou obvykle kvalitní za příznivých cenových podmínek. Dokladem rostoucího významu je i fakt, že na zmíněných výstavách vystavuje stále více čínských firem.

Práce probíhá v rámci výzkumného záměru MSM 6046070905.

Literatura:

- [1] LIBRA, M. – POULEK, V.: *Fotovoltaická transformace energie*. Elektro 2/2010.
- [2] APPELYARD, D.: *Recyklace PV materiálů*. Alternativní energie, 5/2009, s. 18–21.