

# Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie

doc. Ing. Martin Libra, CSc., Česká zemědělská univerzita v Praze a Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Ing. Vladislav Poulek, CSc., Poulek Solar, s. r. o., Praha

## Úvod

Již několikrát jsme na stránkách časopisu SVĚTLO psali o konstrukci a aplikacích solárních fotovoltaických (PV) systémů. Snad nebude na škodu v tomto článku vysvětlit i fyzikální podstatu přeměny, k níž v polovodičových fotovoltaických člancích dochází. Nejběžnější jsou PV články na bázi krystalického křemíku, proto princip vysvětlíme právě na nich. V PV člancích na bázi jiných polovodičů je situace obdobná.

Podle typu nosiče náboje se polovodiče dělí na vlastní (intrinsecké) a příměsové. Příměsové polovodiče mohou být dopované typu N (majoritními nosiči náboje jsou elektrony) nebo typu P (majoritními nosiči jsou díry, které se chovají jako částice s kladným nábojem). Podrobný popis procesů probíhajících v polovodičích a popis chování elektronů a děr je velmi náročný; zájemci o hlubší pochopení této problematiky ho mohou najít v kterékoliv monografii o fyzice pevných látek, např. [1], [2] a [3]. Zde se v dalším textu pokusíme nastínit problém populárně, pouze v maximálním zjednodušení.

## Pásová teorie polovodičů

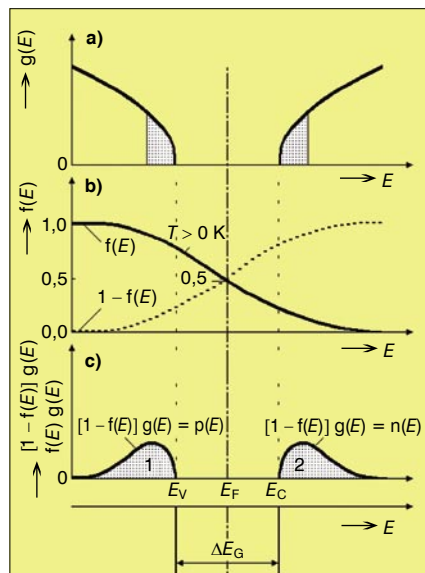
Křemík (atom Si) obsahuje čtrnáct elektronů, má krystalovou strukturu diamantu, takže každý atom Si je obklopen čtyřmi nejbližšími sousedy. Poslední čtyři elektrony vytvářejí s těmito sousedy kovalentní vazby. Energie volného elektronu, který nepodléhá působení žádných sil, může nabývat libovolných hodnot. Naproti tomu energie elektronu v krystalu křemíku nabývá pouze určitých hodnot v důsledku pohybu v poli periodického potenciálu. Tyto hladiny energie jsou rozděleny do páسů nazývaných „páсы dovolených energií“. Páсы dovolených energií jsou odděleny „páсы zakázaných energií“.

Důležitou roli hrají tyto páсы: valenční pás (za velmi nízkých teplot poslední obsazený), poslední zakázaný pás a vodivostní pás (za velmi nízkých teplot první neobsazený). Valenční pás je tvořen energetickými stavy valenčních elektronů. Protože těchto stavů je stejný počet jako valenčních elektronů v celém

krystalu, budou za velmi nízkých teplot všechny obsazené. Po valenčním pásu následuje pás zakázaných energií, tzn. že žádný elektron nemůže mít energii odpovídající stavu v tomto pásu. Dále následuje vodivostní pás; jeho stavy za velmi nízkých teplot nejsou obsazené. Uvnitř páсů dovolených energií jsou rozdíly mezi jednotlivými energetickými hladinami neměřitelně malé.

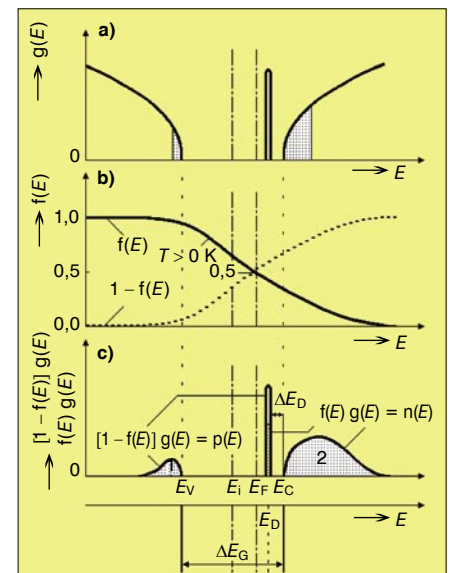
Nejvyšší energetická hladina valenčního pásu se označuje  $E_V$ , nejnižší hladina vodivostního pásu se zpravidla

divostním pásu. U atomu křemíku tak vzniklo prázdné místo po pevně vázaném elektronu. Buď zde může opět uvíznout volný elektron, což se v energetickém schématu projeví jako zpětný přestup elektronu z vodivostního pásu na příslušnou hladinu ve valenčním pásu, nebo sem může přeskočit pevně vázaný elektron od sousedního atomu. Takový elektron musí mít dostatek energie, aby překonal určitou energetickou bariéru. Tím se ale volné místo posune k sousednímu atomu a dalšími podob-



Obr. 1. Model elektronů a děr v případě vlastního polovodiče

značí  $E_C$ . Šířka zakázaného pásu tedy je  $\Delta E_G = E_C - E_V$ . Důležitou energetickou hladinou je tzv. Fermiho energie  $E_F$ . Přesná definice by přesáhla rámec tohoto článku. U vlastního polovodiče (např. čistého křemíku) leží hladina Fermiho energie uprostřed zakázaného pásu. Obsazené hladiny ve valenčním pásu reálně odpovídají valenčním elektronům pevně vázaným u vlastních atomů. Dodáním např. tepelné (fonon [4]) nebo světelné (foton [5]) energie se některý elektron uvolní od svého atomu a stane se uvnitř krystalu volně pohyblivým. V energetickém schématu se to projeví tak, že tento elektron uvolní energetickou hladinu ve valenčním pásu a obsadí hladinu s vyšší energií ve vo-



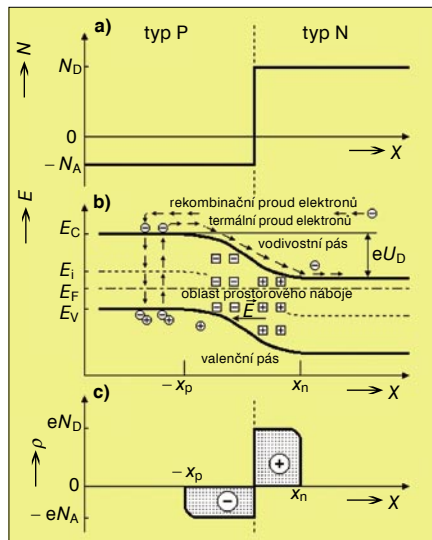
Obr. 2. Model elektronů a děr v případě polovodiče typu N

nými přeskoky se může dále posouvat. V elektrickém poli se volně i přeskakující vázané elektrony posunují proti směru intenzity elektrického pole, neboť mají záporný elektrický náboj. To znamená, že prázdné místo se posouvá ve směru pole. Prázdné místo se tedy chová jako částice s kladným nábojem a větší hmotností, než jakou má volný elektron. Tato částice se označuje „díra“.

## Vlastní polovodič

Ve vlastním (intrinseckém) polovodiči uvolnění jednoho elektronu znamená vznik jedné díry, počet volných elektronů a děr je tedy stejný. Krystal navenek zůstává elektricky neutrální. Je-li genera-

ce páru elektron-díra vyvolána dopadajícím fotonem (kvantum světelného záření), energie fotonu musí být větší než šířka zakázaného pásu nebo jí musí být rovna. Fotony s menší energií polovodičem procházejí a fotony s větší nebo rovnou energií generují páry elektron-díra a tak se pohlcují. Šířka zakázaného pásu křemíku je zhruba  $\Delta E_G \approx 1,1$  eV, je proto transparentní pro fotony s nižšími



Obr. 3. Model přechodu PN

energiemi, kterým odpovídají vlnové délky přibližně větší než  $\lambda \geq 1\ 100$  nm (viz známý vztah pro energii fotonu

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $\nu$  je frekvence a  $c$  je rychlost světla [5]).

Na obr. 1 jsou graficky znázorněny důležité charakteristiky vlastního polovodiče. Na obr. 1a je funkce  $g(E)$ , která představuje hustotu stavů (počet stavů na jednotkový interval energií) ve valenčním a vodivostním pásu v závislosti na energii. Funkce  $f(E)$  (tzv. rozdělovací funkce – obr. 1b) udává pravděpodobnost obsazení stavu s energií  $E$  elektronem. Hodnota  $1 - f(E)$  je pravděpodobnost neobsazení stavu elektronem. Jak je z obrázku zřejmé, pravděpodobnost, že částice bude nabývat energií odpovídající Fermiho energii  $E_F$ , je 0,5. Elektronů patří do skupiny částic zvaných fermiony a řídí se Fermiho-Diracovou statistikou. Rozdělovací funkci na obr. 1b lze matematicky vyjádřit ve tvaru

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je absolutní termodynamická teplota.

Na obr. 1c funkce  $f(E)g(E) = n(E)$  udává koncentraci elektronů ve vodivostním

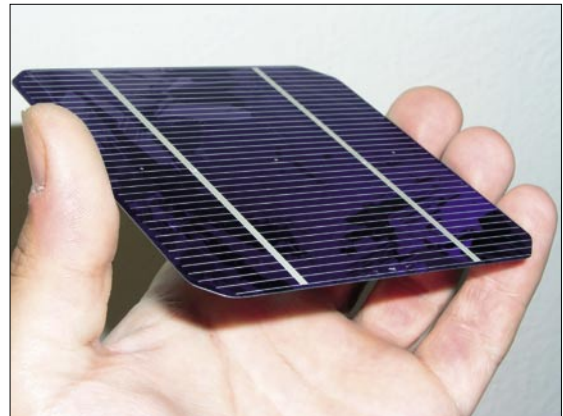
páru, funkce  $1 - f(E)g(E) = p(E)$  udává koncentraci děr ve valenčním pásu. Vytečkované plochy 1, 2 pod křivkami jsou úměrně těmto koncentracím. U vlastního polovodiče jsou tyto plochy stejné velikosti.

### Polovodič typu N

Jsou-li v krystalu křemíku nahrazeny některé atomy Si atomy prvku V. skupiny Mendělejevovy tabulky prvků (např. As, P, Sb), které mají pět valenčních elektronů, budou čtyři z nich vázány kovalentní vazbou s nejbližšími atomy Si. Pátý elektron bude jen slabě vázán k atomu příměsi. Takto dopovaný polovodič se nazývá polovodič typu N (angl. negative). Dodáním relativně malé energie se tento elektron „utrhne“ a stane se uvnitř krystalu volně pohyblivým. Tyto pětimocné atomy se nazývají donory, protože dodávají volné elektrony. Přítomnost takové příměsi se projeví v energetickém schématu vznikem lokálních energetických hladin, které leží v zakázaném pásu v blízkosti dolní hladiny vodivostního pásu  $E_C$ .

Na obr. 2 jsou pro polovodič typu N znázorněny analogické závislosti jako pro vlastní polovodič na obr. 1. Donorová hladina energie je označena  $E_D$ . Energie  $\Delta E_D$ , potřebná pro přechod elektronu z této hladiny do vodivostního pásu, je relativně malá – přibližně  $\Delta E_D \approx 0,012$  eV. Při pokojové teplotě (tepelná energie dodaná elektronu je asi  $kT = 0,025$  eV) může

elektron snadno přejít do vodivostního pásu. Hladina Fermiho energie je posunuta směrem k vyšším energiím (obr. 2b). Vzhledem k malé hodnotě  $\Delta E_D$  jsou při pokojové teplotě (i při nižších teplotách) donorové atomy ionizovány a koncentrace elektronů ve vodivostním pásu je vyšší než koncentrace děr ve valenčním pásu. Na obr. 2c je plocha 2 větší než plocha 1.



Obr. 5. Standardní křemíkový PV článek

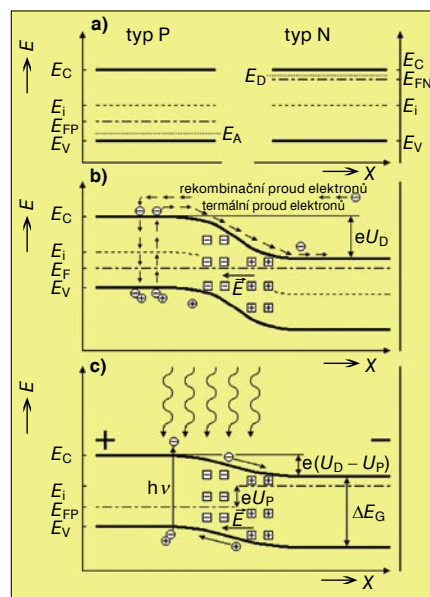
### Polovodič typu P

Nahrazením některých atomů Si v krystalu křemíku atomy prvku III. skupiny periodické tabulky prvků (např. B, Al, Ga) tyto příměsi obsahují pouze tři valenční elektrony. Jedna vazba těchto atomů nebude zaplněna a bude se chovat jako díra. V důsledku tepelné energie může do nezaplňené vazby přeskočit valenční elektron od sousedního atomu Si a díra se může pohybovat krystalem, jak již bylo popsáno. Takto dopovaný polovodič se nazývá polovodič typu P (angl. positive) a příměsi, které tvoří záchytná centra pro elektrony, jsou akceptory.

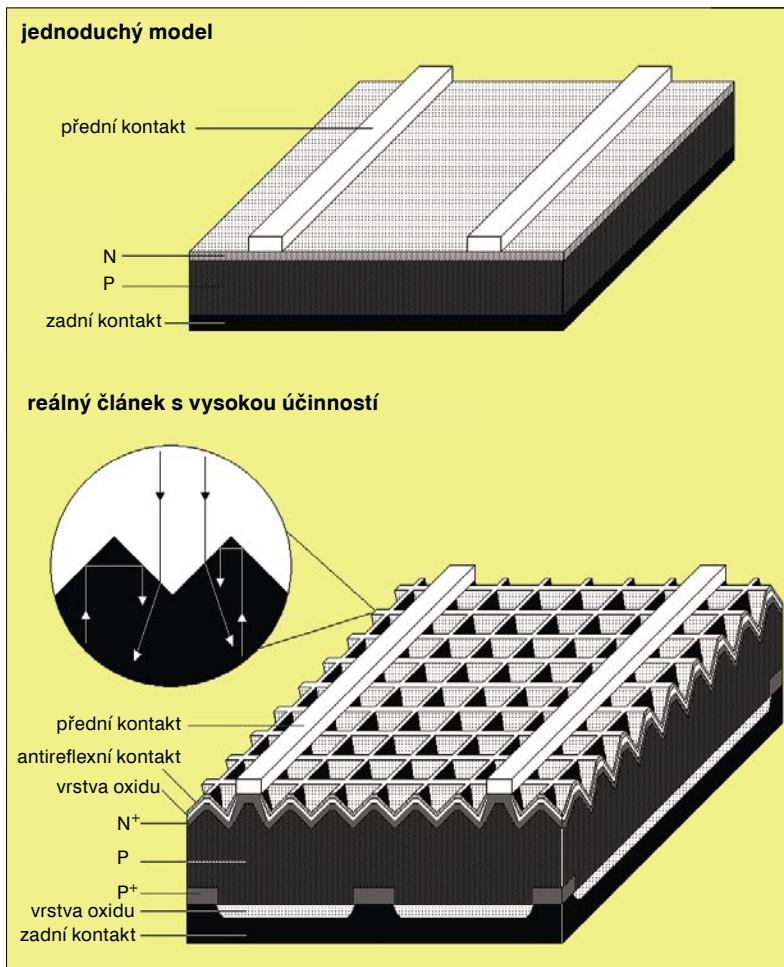
V energetickém schématu se to projeví analogicky se situací na obr. 2 pro polovodič typu N. Vznikne akceptorová energetická hladina  $E_A$  v zakázaném pásu v blízkosti horního okraje valenčního pásu. Dodáním relativně malé energie  $\Delta E_A$  se na této hladině mohou zachytit elektrony přeskokem z valenčního pásu, kde po nich zůstane díra. Takový atom akceptoru má potom o elektron víc a navenek je záporně nabitý. Tvoří pevně vázaný záporný náboj. Díra, která je tím generována ve valenčním pásu, je uvnitř krystalu volně pohyblivá. Znamená to, že v polovodiči typu P je koncentrace děr vyšší než koncentrace volných elektronů a hladina Fermiho energie je posunuta směrem k nižším energiím.

### Nehomogenní polovodič

Jestliže je v krystalu nehomogenní koncentrace příměsí, tedy některá ob-



Obr. 4. Model energetických hladin PV článku a fotovoltaické přeměny energie



Obr. 6. Schéma fotovoltaického článku

vu dynamické rovnováhy (nikoliv statické), tzn. že v celém objemu polovodiče při teplotě  $T > 0$  K neustále dochází ke generaci i rekombinaci elektronů a děr. Přechod PN tedy tečou elektrické proudy oběma směry, jak je naznačeno na obr. 3b. Situace je zde znázorněna jen pro proudy elektronů, proudy děr se chovají analogicky. Některé elektrony v polovodiči typu N mohou mít vyšší energii, než jaká odpovídá potenciálové bariéře difuzního napětí  $U_D$ . Tyto elektrony mohou přecházet přes přechod PN do polovodiče typu P, kde rekombinují s volnými dírami. Tento proud se nazývá rekombinační. Současně v polovodiči typu P generují páry volných elektronů a děr, volné elektrony jsou v elektrickém poli přechodu PN urychleny směrem do polovodiče typu N. Tento proud se nazývá termální nebo difuzní. Bez přiložení vně-



Obr. 8. Expozice PV panelů firmy Shell Solar na výstavě o solární energii v Paříži v červnu 2004

last je dopována více a jiná méně stejným či opačným typem příměsí, volné nosiče náboje (elektrony a díry) mají snahu podle zákonitostí difuze uniknout z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací a vytvořit rovnoměrné rozložení. Když ale volné nosiče z některých oblastí unikají, zůstávají na původních místech pevně vázané náboje ionizovaných příměsí s opačným znaménkem, které tvoří prostorový náboj. Tak uvnitř krystalu vznikají poměrně silná lokální elektrická pole, ačkoliv navenek se krystal jeví jako elektricky neutrální. Tato pole brání dalšímu unikání volných nosičů z míst s vyšší koncentrací a systém se ustálí v rovnovážném stavu.

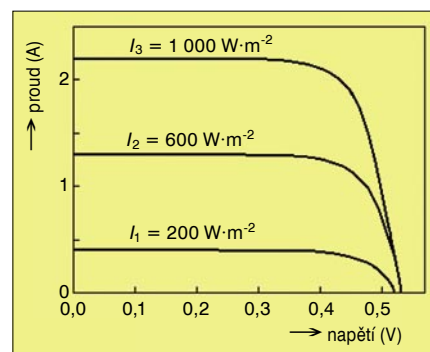
zané náboje ionizovaných příměsí vytvoří oblasti prostorového náboje (v polovodiči typu N kladný, obr. 3c). Mezi nimi vznikne elektrické pole, které brání dalšímu toku volných nosičů. Hladina Fermiho energie musí být v rovnovážném stavu vyrovnána v celém krystalu, proto dochází k ohybu pásů v místě přechodu. Idealizovanou situaci znázorňuje obr. 3b. Šířka přechodu PN je dána body  $x_p$  a  $x_n$ ,  $U_D$  je potenciálový rozdíl mezi různě dopovanými oblastmi (tzv. difuzní napětí).

Takto popsaný přechod PN může být jednoduchou polovodičovou diodou. Systém v rovnovážném stavu je však ve sta-

šího napětí jsou proudy v obou směrech vyrovnány a navenek se neprojeví. V případě přiložení vnějšího napětí a uzavření elektrického obvodu je porušena rovnováha. Je-li kladné znaménko na straně typu P, změní se zakřivení pásů, sníží se potenciálová bariéra  $U_D$  o hodnotu  $\Delta V$  a tím převládne proud elektronů směrem do polovodiče typu P a děr opačně. Přechod PN je tak orientován v propustném směru. Při opačné polaritě vnějšího napětí se zvýší potenciálová bariéra  $U_D$  a tím se zmenší rekombinační proud. Převládá termální proud, který je však menší v důsledku nízké koncentrace elektronů v polovodiči typu P. Přechod PN je tak orientován v závěrném směru.

### Přechod PN

Speciálním případem nehomogenního rozložení příměsí je přechod PN (obr. 3). Ten vzniká tehdy, jestliže část krystalu je dopována jako polovodič typu P a sousední část je dopována jako polovodič typu N. V místě přechodu je gradient koncentrace volných nosičů  $N$  ve směru přechodu, který je na obr. 3a ztotožněn se směrem  $x$ ,  $N_D$  je koncentrace donorů,  $N_A$  je koncentrace akceptorů. Jak bylo řečeno, část volných elektronů přejde z oblasti typu N do oblasti typu P a část děr opačně. Pevně vá-



Obr. 7. Voltampérové charakteristiky osvětleného PV článku

### Princip fotovoltaické přeměny energie

Nyní k samotnému principu fotovoltaické přeměny energie. K této přeměně do-

cháží v polovodičových fotovoltaických článcích, kde se energie dopadajících fotonů mění na elektrickou energii. Jedná se v podstatě o velkoplošnou diodu, přechod PN je orientován kolmo k čelní ploše mezi přední a zadní stranou. Jestliže na fotovoltaický článek dopadají fotony s větší energií, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu, tyto fotony generují páry elektron-díra. Tak odevzdávají svou energii a pohlcují se. Případný přebytek energie většinou předají kmitům mřížky a tak ho přemění v teplo; to vede k ohřevu materiálu polovodiče. Páry elektron-díra generované v oblasti přechodu PN jsou od sebe odděleny elektrickým polem  $E$  mezi vázanými prostorovými náboji, díry jsou urychleny ve směru pole, elektrony opačně. Mezi opačnými póly PV článku se objeví elektrické napětí a po zapojení do elektrického obvodu teče obvodem stejnosměrný elektrický proud. PV článek se tak stává zdrojem elektrické energie.

Popsanou situaci schematicky znázorňuje obr. 4. Na obr. 4a je schéma energetických hladin v polovodiči typu P a typu N a z obr. 4b je zřejmé vyrovnání Fermiho energie a ohyb pásů u přechodu PN v neosvětleném fotovoltaickém článku. Jsou zde znázorněny i rekombinační a termální proudy v rovnovážném stavu a rovněž jsou vyznačeny oblasti prostorového náboje a difuzní napětí  $U_D$ . Ve tmě se PV článek chová jako polovodičová dioda.

Na obr. 4c je znázorněna situace při osvětlení PV článku, který není zapojen v elektrickém obvodu. Dopadající fotony poruší rovnováhu nebo lépe řečeno ustaví jinou rovnováhu. Zvýší se generace párů elektron-díra, v oblasti přechodu jsou ge-



Obr. 10. Studentka Technické fakulty ČZU v Praze při manipulaci s PV solárním panelem

a rozdíl mezi nimi odpovídá fotovoltaickému napětí  $U_P$ , které je rovněž vyznačeno. Toto napětí může maximálně odpovídat vyrovnání původního zakřivení pásů. To u křemíkových PV článků bývá přibližně  $U_P \approx 0,6$  V. Další zvýšení intenzity osvětlení PV článku fotovoltaické napětí naprázdno už nezvýší, neboť fotovoltaické napětí se vykompenzuje s opačným napětím prostorových nábojů na přechodu PN a již nedochází k oddělování směru pohybu generovaných elektronů a děr v oblasti přechodu PN. Problém lze chápat i tak, že snížení potenciálové bariéry  $U_D$  při osvětlení vede ke zvýšení rekombinačního toku elektronů do polovodiče typu P a rekombinačního toku děr opačně a tak se kompenzuje zvýšení difuzního proudu v důsledku oddělování generovaných elektronů a děr v elektrickém poli  $E$  mezi vázanými prostorovými náboji v oblasti přechodu PN. Vzniklé fotovoltaické napětí se tak podílí na ustavení nové rovnováhy.

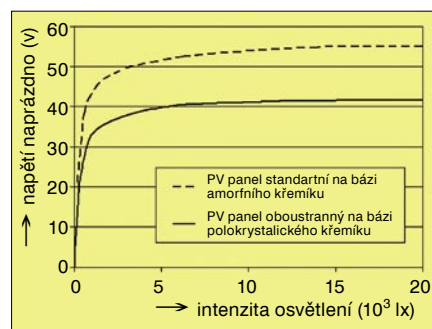
Zapojí-li se osvětlený PV článek do elektrického obvodu, vodivé spojení obou pólů znamená snížení fotovoltaického napětí (v tomto případě elektromotorického napětí zdroje) a tím i změnu v zakřivení pásů, vedoucí k opětovnému zvýšení potenciálové bariéry  $U_D - U_P$ . Tím se zmenší rekombinační proud a převládne termální proud v důsledku oddělování generovaných elektronů a děr v elektrickém poli  $E$  mezi vázanými prostorovými náboji. Součet obou proudů tedy již nebude nulový a výsledný proud bude do-

dáván do elektrického obvodu PV článkem jako zdrojem.

Protože šířka zakázaného pásu krystalického křemíku  $\Delta E_G \approx 1,1$  eV, jsou krystalické křemíkové PV články citlivé na fotony viditelného a blízkého infračerveného záření s vlnovými délkami kratšími než zhruba  $\lambda \leq 1\,100$  nm.

## Fotovoltaické články

Standardní křemíkový PV článek je na obr. 5. Bylo řečeno, že článek je velkoplošnou diodou s přechodem PN orientovaným kolmo k čelní ploše. Na přední stranu bývá nanášena antireflexní vrstva a přední kontakt ve tvaru mřížky či hřebínku, aby zakrýval co nejmenší část plochy a aby světlo mohlo dopadat na co největší plochu. Zadní kontakt bývá u standardních panelů celoplošný. Tloušťka křemíkových článků obvykle je okolo  $d \approx 0,3$  mm. Sché-



Obr. 11. Závislost napětí naprázdno na osvětlení u dvou typů fotovoltaických panelů



Obr. 9. PV solární systém 500 W s automatickým pohyblivým stojanem TRAXLE™ a s hřebenovým koncentrátorem záření (foto Steve Jasper)

nerované elektrony a díry jsou urychlovány v elektrickém poli  $E$  ve směru šipek (v závěrném směru – to odpovídá proudu tekoucímu zdrojem od záporného pólu ke kladnému), strana typu P se nabíjí kladně a strana typu N se nabíjí záporně. Potenciálová bariéra  $U_D$  se sníží, Fermiho hladiny v oblastech typu P a typu N se rozdělí

ma PV článku je na obr. 6. Na obr. 6a je schematicky znázorněn jednoduchý model. Takto konstruovaný článek by sice fungoval podle již popsaného principu, ale měl by nízkou účinnost fotovoltaické přeměny energie hlavně v důsledku rekombinačních ztrát. Účinnost je zvýšena několika konstrukčními zdokonaleními, patrnými na obr. 6b. Antireflexní vrstva na přední straně minimalizuje odraz, aby maximum fotonů vniklo do PV článku a proniklo až do oblasti přechodu PN. Vrstvy nevodivého oxidu ( $\text{SiO}_2$  – křemen) pasivují povrch a jen v určitých místech je vrstva proleptána a pouze zde se odvádí elektrický náboj. Vyleptaná struktura malých pyramidek na přední straně způsobuje, že fotony snadno vstupují do PV článku. Jestliže 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. 6b. Znovu procházejí přechodem PN a pravděpodobnost foto-

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

Účinnost kvalitních PV článků na bázi krystalického křemíku ze sériové výroby se dnes pohybuje kolem 20 %, účinnost některých laboratorních vzorků takovýchto článků je ještě vyšší. Účinnost PV článků na bázi jiných polovodičů (např. GaAs, InP) je o trochu vyšší, přibližně 25 %, avšak jejich cena je několikanásobně vyšší.

Na obr. 7 jsou voltampérové charakteristiky osvětleného PV článku na bázi krystalického křemíku zapojeného do elektrického obvodu. Jednotlivé křivky odpovídají různým intenzitám osvětlení. Průsečíky křivek se svislou osou udávají proud nakrátko, odpoví-

dají tedy „nulovému“ odporu ve vnějším obvodu neboli zkratování obou pólů PV článku. Roste-li odpor zátěže, směr je od těchto bodů po křivkách směrem rostoucího napětí (doprava). Průsečíky křivek s vodorovnou osou udávají napětí naprázdno, odpovídají tedy „nekonečnému“ odporu ve vnějším obvodu neboli rozpojení obvodu. Optimální zátěž PV článku má takový odpor, při kterém pracovní bod leží v tom bodě voltampérové charakteristiky, ve kterém součin napětí a proudu má největší hodnotu. Tehdy článek poskytuje maximální možný výkon.

### Fotovoltaické panely

Do fotovoltaických panelů se jednotlivé články skládají v sérioparalelní kombinaci, aby při definovaném osvětlení poskytovaly žádané stejnosměrné napětí a maximální výkon. Výkon závisí na velikosti celkové plochy PV článků, tedy i na velikosti plochy panelů. Na obr. 8 je expozice PV panelů firmy Shell Solar na výstavě o solární energii v Paříži v červnu 2004 [6], na obr. 9 je PV solární systém naší kon-

strukce s automatickým pohyblivým stojanem TRAXLE™ a s hřebenovým koncentrátorem záření instalovaný ve Španělsku. Na obr. 10 je studentka Technické fakulty ČZU v Praze při manipulaci s PV solárním panelem. Obr. 11 ukazuje závislost napětí naprázdno na intenzitě osvětlení u dvou typů námi používaných fotovoltaických panelů. Více informací o fotovoltaických systémech uvádí např. [7].

### Literatura:

- [1] KITTEL, Ch.: *Úvod do fyziky pevných látek*. Academia, Praha, 1985.
- [2] ECKERTOVÁ, L. a kol.: *Fyzikální elektronika pevných látek*. Karolinum, Praha, 1992. ISBN 80-7066-535-1.
- [3] FRANK, H. – ŠNEJDAR, V.: *Principy a vlastnosti polovodičových součástek*. SNTL, Praha, 1976.
- [4] JEDLIČKA, M.: *Fotony a fonony*. Světlo, 2001, roč. 4, č. 2, s. 12.
- [5] LIBRA, M. a kol.: *Fyzikální podstata světla*. Světlo, 2000, roč. 3, č. 4, s. 3–4.
- [6] LIBRA, M. – POULEK, V.: *Paříž hostila fotovoltaickou konferenci a výstavu*. Elektro, 2005, roč. 15, č. 1, s. 8–9.
- [7] [www.solar-trackers.com](http://www.solar-trackers.com)