

Fotovoltaická transformace energie

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

Úvod

K fotovoltaické transformaci energie elektromagnetického záření na energii elektrickou dochází ve fotovoltaických (PV) článcích. Nejběžnější jsou PV články polovodičové na bázi krystalického křemíku, proto fyzikální podstatu této transformace energie vysvětlíme právě na nich. Pro PV články na bázi jiných polovodičů je situace analogická. Existují i fotovoltaické články na bázi organických makromolekul či nanovláken, které mohou být dokonce levnější, zatím však mají výrazně nižší účinnost přeměny energie a jejich objemy výroby jsou zanedbatelné.

Základní pojmy fyziky polovodičů

Podle typu nosiče náboje dělíme polovodiče na vlastní (intrinsické) a příměšové. Příměšové 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 a zájemci o hlubší pochopení této problematiky ho mohou najít v kterékoliv monografii o fyzice pevných látek, např. [1], [2]. My se v tomto článku pokusíme nastínit problém pouze v maximálním zjednodušení.

Křemík (atom Si) obsahuje čtrnáct elektronů, má krystalovou strukturu diamantu, takže každý atom Si je obklopen čtyřmi nejbližšími sousedy. Poslední čtyři elektrony (valenční) 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 pásů nazývaných „pásky dovolených energií“. Pásky dovolených energií jsou odděleny „pásky zakázaných energií“.

Důležitou roli hrají tyto pásky:

- valenční pás (za velmi nízkých teplot poslední obsazený),
- poslední zakázaný pás,
- vodivostní pás (za velmi nízkých teplot první neobsazený).

Valenční pás sestává z energetických stavů valenčních elektronů. Protože těchto stavů je stejný počet jako valenčních elektronů v celém krystalu, budou za velmi nízkých teplot všechny obsazené. Po valenčním

pásem následuje pás zakázaných energií, tzn. že žádný elektron nemůže mít energii odpovídající stavu v tomto pásmu. Dále následuje pás vodivostní, jehož stavy za velmi nízkých teplot nejsou obsazené. Uvnitř pásů dovolených energií jsou rozdíly mezi jednotlivými energetickými hladinami neměřitelně malé.

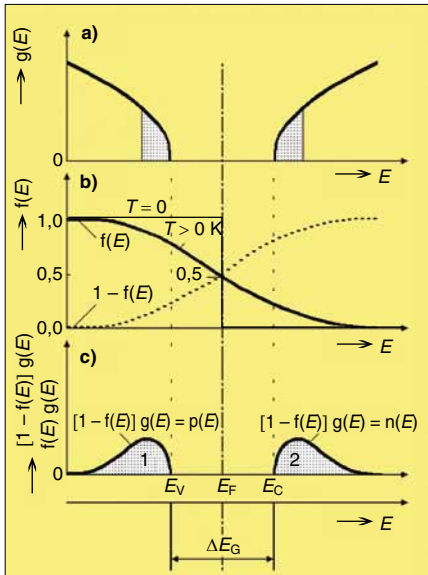


nejvyšší energetická hladina valenčního pásu se označuje E_V , nejnižší hladinu vodivostního pásu zpravidla značíme E_C . Šířka zakázaného pásu je tedy $\Delta E_G = E_C - E_V$. Důležitou energetickou hladinou je tzv. Fermiho energie E_F . Přesná definice by přesáhla rámec této publikace, je např. v uvedené monografii [1]. U vlastního polovodiče (např. čistého křemíku) leží hladina Fermiho energie uprostřed zakázaného pásu. V nejnižším energetickém stavu valenční elektrony úplně obsazují všechny hladiny ve valenčním pásmu a nemohou zprostředkovat vedení el. proudu. Dodáním energie, např. tepelné (fonon) nebo světelné (foton), se některé elektrony uvolní od svého atomu, čímž v energetickém schématu přejdou do vodivostního pásu. Va-

lenční i vodivostní pás se stanou pásy částečně obsazenými. V energetickém schématu se to projeví tak, že tyto elektrony uvolní energetické hladiny ve valenčním pásmu a obsadí hladiny s vyšší energií ve vodivostním pásmu. Stanou se tak elektrony, které se mohou v krystalu volně pohybovat a mohou zprostředkovat vedení elektrického proudu. U některých atomů křemíku tak vznikla prázdná místa. Buď zde mohou opět uvíznout volné elektrony, což se v energetickém schématu projeví jako zpětné přestupy elektronů z vodivostního pásu na příslušné hladiny ve valenčním pásmu, nebo sem mohou přeskakovat elektrony od sousedních atomů. Tím se ale prázdná místa posunou k sousedním atomům a dalšími podobnými přeskoky se mohou dále posouvat. V elektrickém poli se volné i přeskakující valenční elektrony posunují proti směru intenzity elektrického pole, neboť mají záporný elektrický náboj. To znamená, že prázdná místa se posunují ve směru pole. Prázdné místo se tedy chová jako částice s kladným nábojem a jinou hmotností, než jakou má vol-

ný elektron. Jestliže se chová jako částice, hovoříme o kvazičástici a nazýváme ji „díra“.

Ve vlastním (intrinsickém) polovodiči uvolnění jednoho elektronu z valenčního pásu znamená vznik jedné díry, počet volných elektronů a děr je tedy stejný. Krystal navenek zůstává elektricky neutrální. Je-li generace páru elektron–díra vyvolána dopadajícím fotonem (elektromagnetická vlna či kvantum světelného záření), energie fotonu musí být větší nebo rovna šířce zakázaného pásu. Fotony s menší energií polovodičem procházejí a fotony s větší nebo rovnou energií generují páry elektron–díra, a tak se pohlcují. Křemík má šířku zakázaného pásu ca $\Delta E_G \approx 1,1$ eV, je proto transparentní pro fotony s nižšími energiemi, kterým odpoví-



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

dají vlnové délky $\lambda \geq 100 \text{ nm}$ – viz známý vztah pro energii fotonu:

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

kde h je Planckova konstanta, ν je frekvence a c je rychlost světla.

Obr. 1 graficky znázorňuje důležité charakteristiky vlastního polovodiče. Na obr. 1a) je znázorněna 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 vidět z obr. 1, pravděpodobnost, že částice bude nabývat energií odpovídající Fermiho energii E_F , je 0,5. Elektrony patří do skupiny částic zvaných fermiony a řídí se Fermi-Diracovou statistikou [1], [2]. To znamená, že rozdělovací funkci na obr. 1b) lze matematicky vyjádřit ve tvaru:

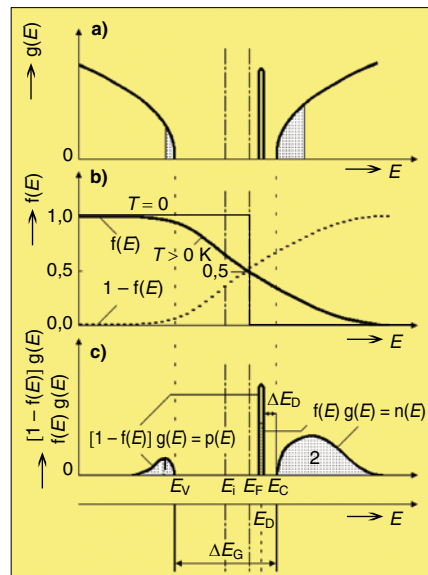
$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$

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

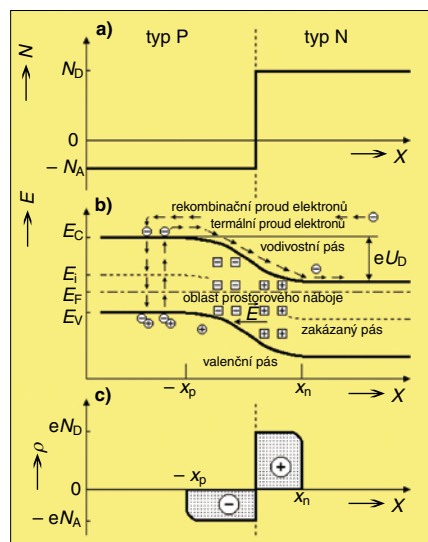
Na obr. 1c) funkce $f(E) \cdot g(E) = n(E)$ udává koncentraci elektronů ve vodivostním pásu, funkce $[1-f(E)] \cdot g(E) = p(E)$ udává koncentraci děr ve valenčním pásu při nenulové teplotě. Vytečkové plochy 1 a 2 pod křivkami jsou úměrné těmto koncentracím. U vlastního polovodiče mají tyto plochy stejnou velikost.

Nahradíme-li v krystalu křemíku některé atomy Si atomy prvku V. skupiny Mendělejevovy periodické 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 dopova-

ný polovodič nazýváme polovodičem typu N (podle angl. *negative*). Dodáním relativně malé energie se tento elektron „utrhne“, což se v energetickém schématu projeví tak, že přejde do vodivostního pásu. Tyto přímocné atomy se nazývají *donory* (dárci), protože dodávají volné elektrony. Přítomnost atomů takové příměsi se projeví v energetickém schématu vznikem lokálních energetických hladin, které leží v zakázaném pásu v blízkosti dolní hladiny vodivostního pásu E_C .



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

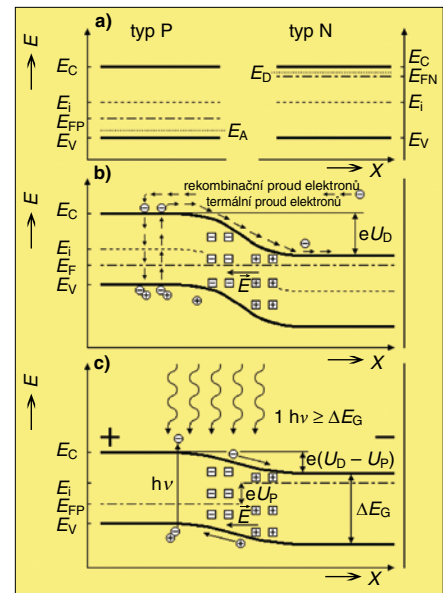


Obr. 3. Model přechodu PN

Na obr. 2 jsou znázorněny pro polovodič typu N analogické závislosti jako pro vlastního polovodič na obr. 1. Donorová hladina energie je označena E_D . Energie ΔE_D potřebná pro přechod elektronu z této hladiny do vodivostního pásu je relativně malá, řádově $\Delta E_D \approx 0,01 \text{ eV}$. Při pokojové teplotě (tepelná energie dodaná elektronu je ca $kT = 0,025 \text{ eV}$) může elektron snadno přejít do vodivostního pásu.

Hladina Fermiho energie je posunuta směrem k vyšším energiím (obr. 2b). Vzhledem k malé hodnotě ΔE_D jsou při pokojové teplotě (i při nižších teplotách) donorové atomy ionizovány (tvorí kladný prostorový náboj) a koncentrace elektronů ve vodivostním pásu je mnohem větší než koncentrace děr ve valenčním pásu vzniklých též tepelnou excitací, ale přes celý zakázaný pás (minoritní nosiče). Na obr. 2c je plocha 2 větší než plocha 1 (obr. 2 však není přesně v měřítku, koncentrace elektronů se rovná součtu koncentrací děr a ionizovaných donorů).

Nahradíme-li v krystalu křemíku některé atomy Si atomy prvku III. skupiny periodické tabulky prvků (např. B, Al, Ga), které obsahují pouze tři valenční elektrony, jedna vazba těchto atomů nebude zaplněna a bude se chovat jako díra. V důsledku tepelné energie může do nezaplněné vazby přeskočit valenční elektron od sousedního atomu Si a díra se může pohybovat krystalem, jak bylo popsá-



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

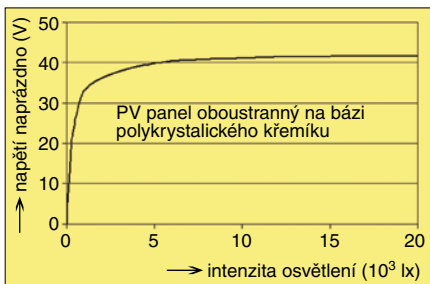
no výše. Takto dopovaný polovodič nazýváme polovodičem typu P (podle angl. *positive*) a příměsí, které tvoří záchytná centra pro elektrony, nazýváme akceptory.

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 ΔE_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 je navněk 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 mnohem větší než koncentrace volných elektronů (minoritní nosiče)

a hladina Fermiho energie je posunuta směrem k nižším energiím.

Přechod PN

Pokud je v krystalu nehomogenní koncentrace příměsí, tedy některá oblast je dopována více a jiná méně stejným či opačným typem příměsí, volné nosiče náboje (elektrony a díry) mají snahu podle zákonitostí difúze unikat z míst s větší koncentrací do míst s menší koncentrací a vytvořit rovnoměrné rozložení. Když ale volné nosiče z některých oblastí unikají, zůstávají na původních mís-



Obr. 5. Závislost napětí naprázdno na osvětlení u fotovoltaického panelu (PV články jsou v sérioparalelní kombinaci, maximální hodnoty osvětlení přímým slunečním zářením na povrchu Země přesahují hodnoty 100 000 lx)

tech pevně vázané náboje ionizovaných příměsí s opačným znaménkem, které tvoří prostorový náboj. Tak uvnitř krystalu vznikají poměrně silná lokální elektrická pole, i když 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.

Speciálním případem nehomogenního rozložení příměsí je strmý přechod PN (idealizovaný model je na 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

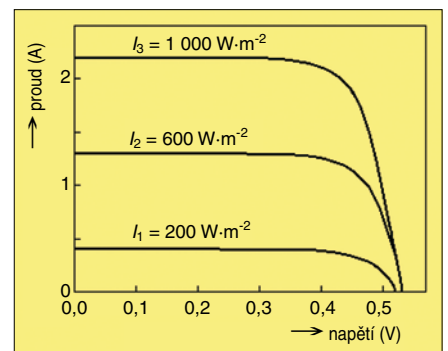
gradient koncentrace volných nosičů *grad N* ve směru přechodu, který je na obr. 3a) ztožněn se směrem x , N_D je koncentrace donorů, N_A je koncentrace akceptorů. Jak bylo řečeno, část volných elektronů přejde z oblasti typu N do oblasti typu P a část děr opačně. Pevně vázané náboje ionizovaných příměsí vytvoří oblasti prostorového náboje (v polovodiči typu N kladný, obr. 3c) a 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. difúzní napětí).

Takto popsaný přechod PN může být jednoduchou polovodičovou diodou. Systém v rovnovážném stavu je však ve stavu dynamické rovnováhy (nikoliv statické), to znamená, že v celém objemu polovodiče při teplotě $T > 0$ K neustále dochází ke generaci i rekombinaci elektronů a děr. Přes 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 difúzního 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 dochází ke generaci párů volných elektronů a děr, volné elektrony jsou v elektrickém poli přechodu PN urychleny směrem do polovodiče typu N. Tento proud se nazývá termální nebo difúzní. Bez přiložení vnějšího napětí jsou proudy v obou směrech vyrovnány a navenek se neprojevují. V případě přiložení vnějšího napětí a uzavření elektrického obvodu dojde k porušení rovnováhy. Je-li kladné znaménko na straně typu P, změnění se

zakřivení pásů, dojde ke snížení potenciálové bariéry U_D o hodnotu ΔV , a tím k převládání proudu elektronů směrem do polovodiče typu P a děr opačně. Přechod PN je tak orientován v propustném směru. Při opačné polaritě vnějšího napětí dochází ke zvýšení potenciálové bariéry U_D , a tím ke snížení rekombinačního proudu. Převládá termální proud, který je však menší v důsledku malé koncentrace elektronů v polovodiči typu P. Přechod PN je tak orientován v závěrném směru.

Objasnění fotovoltaické transformace energie

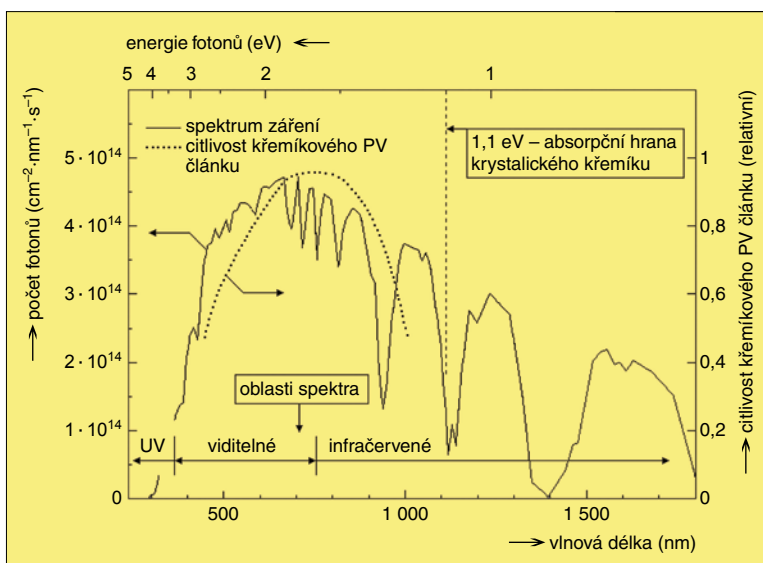
Nyní teprve můžeme objasnit princip fotovoltaické transformace energie. V polovodičových fotovoltaických článcích se ener-



Obr. 7. Volt-ampérové charakteristiky osvětleného PV článku při $t = 50$ °C

gie dopadajících fotonů mění na elektrickou energii. Článek je v podstatě velkoplošnou polovodičovou diodou, přechod PN je orientován kolmo k čelní ploše mezi přední a zadní stranou. Pokud 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 jej přemění v teplo, což 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 vidět schéma energetických hladin v polovodiči typu P a typu N a na obr. 4b) je vidět 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 difúzní napětí U_D . Ve tmě se PV článek chová jako polovodičová dioda.



Obr. 6. Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou

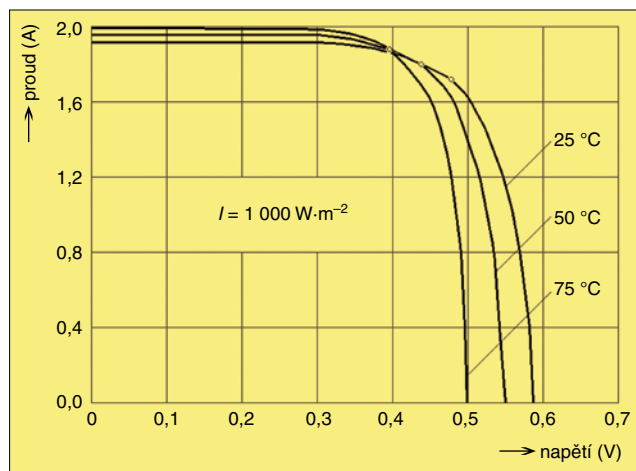
The physical principle of the photovoltaic energy conversion is explained in this paper. The theory of the semiconductors is described and it is applied on the illuminated photovoltaic cells. Processes of the dependence on the irradiation intensity and on the temperature are discussed.

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 generovány elektrony a díry, které jsou urychlovány v elektrickém poli \vec{E} ve směru šipek (tj. 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 a rozdíl mezi nimi odpovídá fotovoltaičkému napětí U_P , které je na obr. 4 rovněž vyznačeno. Toto napětí může odpovídat maximálně vyrovnání původního zakřivení pásů, což u křemíkových PV článků bývá přibližně $U_P \approx 0,6$ V. Další zvýšení intenzity ozáření PV článku už fotovoltaičké napětí naprázdno nezvýší (jak je vidět na obr. 5), neboť fotovoltaičké napětí se vykompenzuje s opačným napětím prostorových nábojů na přechodu PN a už nedochází k oddělování směru pohybu generovaných elektronů a děr v oblasti přechodu PN. Problém lze chápat i tak, že snižuje

doucí k opětovnému zvýšení potenciálové bariéry $U_D - U_P$. Tím se sníží rekombinační proud a převládne termální proud v důsledku oddělování generovaných elektronů a děr v elektrickém poli \vec{E} mezi vázanými prostorovými náboji. Součet obou proudů tedy nebude nulový a výsledný proud bude dodáván do elektrického obvodu PV článkem jakožto zdroj. Protože je 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 $\lambda \leq 1100$ nm. Na obr. 6 je spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením vlnových délek a energií fotonů i s vyznačením šířky zakázaného pásu křemíku neboli absorpční hrany. Pro názornost je vyznačena i typická citlivost křemíkového PV článku.

Měřené charakteristiky PV článku a diskuse

Na obr. 7 jsou volt-ampérové 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, odpovídají tedy „nulovému“ odporu ve vnějším obvodu neboli zkratování obou pólů PV článku. Roste-li odpor zátěže, pohybujeme se 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.



Obr. 8. Volt-ampérové charakteristiky osvětleného PV článku při intenzitě osvětlení $I = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

ní potenciálové bariéry U_D při osvětlení vede ke zvýšení rekombinačního toku elektronů do polovodiče typu P a rekombinačního toku děr opačně. Tak se kompenzuje zvýšení difúzního proudu v důsledku oddělování generovaných elektronů a děr v elektrickém poli \vec{E} mezi vázanými prostorovými náboji v oblasti přechodu PN. Vzniklé fotovoltaičké napětí se tak podílí na ustavení nové rovnováhy.

Zapojíme-li osvětlený PV článek do elektrického obvodu, vodivé spojení obou pólů znamená snížení fotovoltaičkého napětí (v tomto případě elektromotorického napětí zdroje), a tím i změnu v zakřivení pásů ve

Optimální zátěž PV článku má takový odpor, při kterém pracovní bod leží v tom bodě volt-ampérové charakteristiky, ve kterém součin napětí a proudu má největší hodnotu (obdélník daný osami a pracovním bodem na křivce má největší plochu). Tehdy PV článek poskytuje maximální možný výkon.

Obr. 8 ukazuje, jak se volt-ampérové charakteristiky osvětleného PV článku na bázi krystalického křemíku mění s teplotou při konstantní intenzitě osvětlení. Je vidět, že s rostoucí teplotou mírně roste proud nakrátko, ale klesá napětí naprázdno. Při rostoucí teplotě se totiž hladina Fermiho ener-



prof. Ing. Martin Libra, CSc., vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze. Působil ve Fyzikálním ústavu AV ČR, v Tesle Holešovicích, 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 fotovoltaičkých systémů, kterou od té doby řídí.

gie posunuje směrem ke středu zakázaného pásu. Z obr. 4c) je zřejmé, že to musí vést ke snížení PV napětí. Optimální pracovní body jsou na křivkách znázorněny kolečkem, tehdy má největší plochu obdélník určený osami a pracovním bodem. Při rostoucí teplotě, ale konstantní intenzitě osvětlení klesá maximální výkon dodávaný PV článkem, a tak klesá i účinnost fotovoltaičké přeměny energie.

Závěr

V článku byl objasněn princip fotovoltaičké transformace energie a byly uvedeny některé naměřené závislosti. Tyto závislosti jsou v souladu s fyzikální teorií a přispívají k názornosti uvedené problematiky.

Práce probíhá v rámci výzkumného záměru MSM 6046070905.

Literatura

- [1] Eckertová, L. a kol.: *Fyzikální elektronika pevných látek*. Karolinum Praha, 1992, ISBN 80-7066-535-1.
- [2] Kittel, Ch.: *Úvod do fyziky pevných látek*. Academia Praha, 1985.