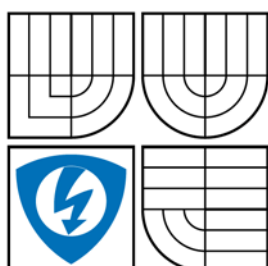


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## VLIV ZASTÍNĚNÍ NA PARAMETRY SOLÁRNÍCH MODULŮ

SHADOW EFFECT ON SOLAR SYSTEMS CHARACTERISTIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. ONDŘEJ DUS**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.**

BRNO 2008



# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Ondřej Dus  
Bytem: Bohdíkovská 2236/85, 787 01, Šumperk  
Narozen/a (datum a místo): 21.1.1983

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc. Ing. Marie Sedlaříková, CSc.  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv zastínění na parametry solárních modulů  
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.  
Ústav: Ústav elektrotechnologie  
Datum obhajoby VŠKP: 10.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

---

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30.5.2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Abstrakt:**

Překládaná práce se zabývá principy fotovoltaiky. Popisuje základní principy fungování solárních článků a jednotlivé generace jejich vývoje. Práce je dále zaměřena na funkce přemost'ovacích diod používaných v solárních panelech. Základním zaměřením práce je návrh a vytvoření modulu pro studium vlivu zastínění pod solárním simulátorem. Studuje charakteristiky solárního modulu s připojenými přemost'ovacími diodami. Solární modul byl vytvořen ve spolupráci se společností Solartec s.r.o.

## **Abstract:**

This work deals with principles of photovoltaics. Describes basic function of solar cells and particular generations of research. Next part of this work is aimed to function of bypass diodes used in solar panels. The general aim is to design and create solar module for study of local shadow effect under solar simulator. Studies characteristics of solar module with connected bypass diodes. Solar module was created in cooperation with company Solartec s.r.o.

## **Klíčová slova:**

Solární článek, solární modul, fotovoltaika,, přemost'ovací diody, zastínění.

## **Keywords:**

Solar cell, solar module, photovoltaics, bypass diodes, shadow effect

## **Bibliografická citace díla:**

DUS, O. *Vliv zastínění na parametry solárních modulů*. Brno, 2008. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D. FEKT VUT v Brně

## **Prohlášení autora o původnosti díla:**

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. 5. 2008

.....

## **Poděkování:**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Vaňkovi pomoc při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci a Ing. Jiřímu Starému za pomoc při výrobě desky plošného spoje. Dále děkuji spolupracující společnosti Solartec s.r.o, za poskytnutí prostoru k realizaci experimentálních prací a konkrétně pracovníkům této firmy Ing. Radimu Bařínkovi a Ing. Jiřímu Sekaninovi za poskytnutou metodickou pomoc a odborné rady.

# Obsah

1	Fotovoltaika.....	8
2	Energie budoucnosti.....	8
3	Fotovoltaika v ČR.....	9
4	Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie.....	10
4.1	Pásová teorie polovodičů.....	10
4.2	Vlastní polovodič.....	11
4.3	Polovodič typu N.....	12
4.4	Polovodič typu P.....	14
4.5	Nehomogenní polovodič.....	14
4.6	Přechod PN.....	14
5	Funkce solárních článků.....	16
6	Konstrukce křemíkových solárních článků.....	17
7	Vývoj solárních článků.....	18
7.1	Články první generace.....	18
7.2	Články druhé generace.....	21
7.3	Články třetí generace.....	22
8	Fotovoltaické moduly.....	23
9	Vliv zastínění.....	25
10	Diody.....	28
10.1	Schottkyho dioda.....	28
10.2	Germaniová dioda.....	28
10.3	Univerzální křemíkové diody.....	28
11	Experimentální část.....	29
11.1	Návrh.....	29
11.2	Použité diody.....	30
11.3	Měření.....	32
12	Závěr a zhodnocení.....	48
13	Literatura.....	49

# 1 Fotovoltaika

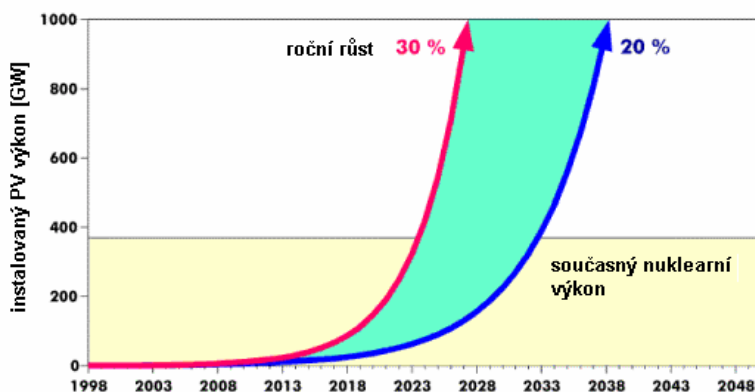
Slovo fotovoltaika má svůj původ ve spojení řeckého výrazu pro světlo „fotos“ a jména italského fyzika Alessandra Volty. Fotovoltaika je v celosvětovém měřítku jedním z nejrychleji se rozvíjejících oborů. Při ideálních rozptylových podmínkách dopadá na povrch Země sluneční záření s výkonem větším než  $1000 \text{ W/m}^2$ . Nabízí se možnost tuto prakticky nevyčerpatelnou formu energie využít. Fotovoltaický efekt byl objeven v roce 1839, avšak jeho praktické využití tehdy ještě nebylo možné. S postupným rozvojem polovodičové technologie se začalo uvažovat o jeho využití, jako zdroje energie pro kosmický výzkum. Od roku 1950 probíhal v této oblasti intenzivní výzkum a počátkem sedmdesátých let se fotovoltaické články začaly využívat rovněž pro civilní aplikace. Jednotlivé solární články mají samy o sobě nízký výkon, a proto se sériovým či paralelním spojením několika článků vytvářejí tzv. solární moduly. Z takových modulů se pak budují fotovoltaické systémy.

## 2 Energie budoucnosti

Fotovoltaika je jedním ze způsobů, jak by bylo možno v budoucnosti získávat energii. Příspěvek fotovoltaiky na celkovém vyráběném množství energie je však stále zanedbatelný. Hlavní předností fotovoltaiky je její univerzální využití. Fotovoltaické systémy lze využívat v široké škále výkonů pohybujících se od zlomků wattu až po velké megawattové elektrárny. Tyto elektrárny se mohou nacházet prakticky kdekoli na povrchu naší planety nebo ve vesmíru. Předpokládá se, že fotovoltaika bude jednou z hlavních základů vývoje rozvojových zemí pro svůj potenciál získávat energii v decentralizované formě bez nutnosti výstavby složité infrastruktury. Fotovoltaické systémy jsou tedy jako zdroje energie vhodné především v místech, kde se nenachází elektrická síť. Jsou ekologicky nezávadné a spolehlivé. Při činnosti fotovoltaického systému nevznikají žádné emise, odpady ani hluk, které by zatěžovaly životní prostředí. Jeho provoz nevyžaduje téměř žádnou obsluhu a údržbu. Je však nutno brát v potaz, že velká část článků se v současné době vyrábí z křemíkových desek prostřednictvím náročných technologií polovodičového průmyslu, a typický článek tak vrátí energii nutnou na jeho výrobu až po zhruba 3 - 5 letech. Životnost článků se pohybuje okolo 30 let a více, takže ve výsledku články energii potřebnou na jejich výrobu znásobí hned několikrát. V současné době již ve světě instalovaný výkon solárních panelů přesáhl



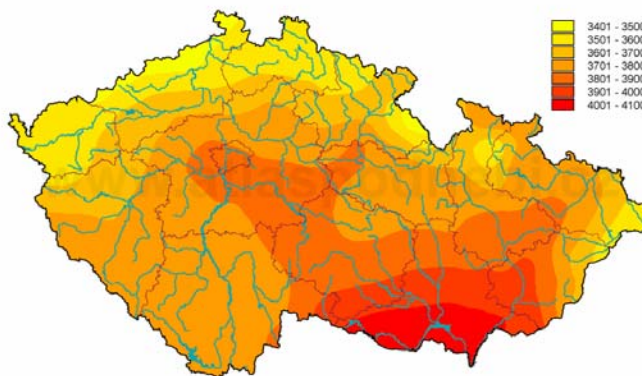
úroveň 5,7 GW<sub>p</sub>. Doposud však díky rychlému růstu výroby článků celkový instalovaný výkon nestačí ani na výrobu nových. V budoucnu je předpokládán exponenciální růst odvětví fotovoltaiky a pokud bude ve světě vývoj jaderné energetiky probíhat stejným tempem jako doposud, je možné, že výroba elektřiny prostřednictvím fotovoltaických zdrojů překoná výrobu v jaderných elektrárnách už během tří až čtyř desetiletí viz obrázek 2.1. [4]



Obrázek 2.1: Předpokládaný růst fotovoltaiky [4]

### 3 Fotovoltaika v ČR

Dostupnost solární energie v ČR ovlivňuje několik faktorů. Mezi ně se řadí například zeměpisná šířka, roční doba, oblačnost, lokální podmínky nebo také sklon plochy na kterou dopadá sluneční záření a spousta dalších. V České republice dopadne za rok na 1 m<sup>2</sup> vodorovné plochy okolo 950 – 1340 kWh energie ve formě slunečního záření. Množství slunečních hodin se podle údajů ČHMÚ pohybuje okolo 1331 – 1844 hod za rok. U běžného fotovoltaického systému pak prakticky platí, že z jedné instalované kW lze vyrobit v průměru 800 – 1100 kWh elektrické energie. Instalovaný výkon fotovoltaiky ke konci roku 2007 se podle CZREA pohybuje okolo 5,3 MW<sub>p</sub> [5].



Obrázek 3.1: Mapa globálního slunečního záření ČR (MJ/m<sup>2</sup> za rok)

## 4 Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie

### 4.1 Pásová teorie polovodičů

Jeden atom křemíku obsahuje čtrnáct elektronů a má krystalovou strukturu diamantu. Každý atom křemíku je tedy obklopen čtyřmi svými nejbližšími sousedy. Kovalentní vazby vytvářejí s těmito sousedy čtyři poslední elektrony. U volného elektronu, který nepodléhá působení žádných sil, může energie nabývat libovolných hodnot. Jinak je tomu pokud jde o elektron v krystalu křemíku. Ten může nabývat pouze určitých hodnot v důsledku pohybu v poli periodického potenciálu. Tyto dané hladiny energie jsou rozděleny do pásů dovolených energií. Pásky dovolených energií oddělují pásky zakázaných energií. Důležité jsou především následující pásky. Valenční pás, který bývá za velmi nízkých teplot poslední zakázaný pás. Dalším důležitým pásem je vodivostní pás a k němu poslední zakázaný pás, který bývá naopak za velmi nízkých teplot prvním neobsazeným. Valenční pás tvoří energetické stavy valenčních elektronů. Za velmi nízkých teplot budou tyto obsazeny, protože je jich stejný počet jako valenčních elektronů v celém krystalu. Za valenčním pásem následuje pás zakázaných energií. Žádný elektron tedy nemůže mít energii, která by odpovídala tomuto pásu. Dalším pásem je pás vodivostní. Stavy tohoto pásu nejsou za velmi nízkých teplot obsazeny. Rozdíly mezi jednotlivými energetickými hladinami uvnitř pásů dovolených energií jsou neměřitelně malé. Nejvyšší energetickou hladinu valenčního pásu označujeme  $E_v$  a nejnižší hladina vodivostní pásu bývá zpravidla značena  $E_c$ . Šířka zakázaného pásu je tedy  $\Delta E_G = E_c - E_v$ . Důležitou hladinou je také Fermiho hladina. Hladina Fermiho energie u vlastního polovodiče, jakým je například čistý křemík, leží uprostřed zakázaného pásu.

Elektronům pevně vázaným u vlastních atomů reálně odpovídají obsazené hladiny ve valenčním pásu. Elektron se uvnitř krystalu uvolní od svého atomu a stane se volně pohyblivým, pokud je mu dodána energie. Tato energie může být například tepelná (fonon) nebo světelná (foton). Tato změna se v energetickém schématu projeví tak, že daný elektron uvolní energetickou hladinu ve valenčním pásu a obsadí hladinu s vyšší energií v pásu vodivostním. U atomu křemíku tím vznikne po tomto pevně vázaném elektronu díra. V místě díry pak může opět uvíznout volný elektron. To se v energetickém schématu projeví jako zpětný přestup elektronu z vodivostního pásu na odpovídající hladinu v pásu valenčním. Další možností je, že do místa díry přeskočí elektron pevně vázaný v sousedním atomu. K tomu však potřebuje mít dostatečnou energii, aby mohl překonat určitou energetickou bariéru. Tím dojde k posunutí díry na sousední atom. Tato situace se může několikrát opakovat a podobnými přeskoky se může díra dále posouvat. Volné i přeskakující vázané elektrony se v elektrickém poli posunují proti směru jeho intenzity a to proto, že mají záporný elektrický náboj. Naopak díry se posunují ve směru intenzity elektrického pole a chovají se jako částice s kladným nábojem a hmotností větší, než jakou má volný elektron [9].

## 4.2 Vlastní polovodič

Vlastní neboli intrinsický polovodič je charakterizován tím, že uvolněním jednoho elektronu vznikne jedna díra. Počet volných elektronů a děr je tedy stejný. Navenek zůstává krystal elektricky neutrální. Pokud generování páru elektron – díra vyvolá dopad fotonu, musí být energie fotonu větší nebo rovna šířce zakázaného pásu. Fotony které mají energii menší procházejí polovodičem skrz a ty s energií větší nebo rovnou jsou tedy pohlceny. Šířka zakázaného pásu je u křemíku  $\Delta E_G \approx 1,1$  eV, je tedy transparentní pro fotony s nižšími energiemi, čemuž odpovídají vlnové délky větší než  $\lambda \geq 1\ 100$  nm, což lze zjistit ze vztahu (4.1) pro energii fotonu.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

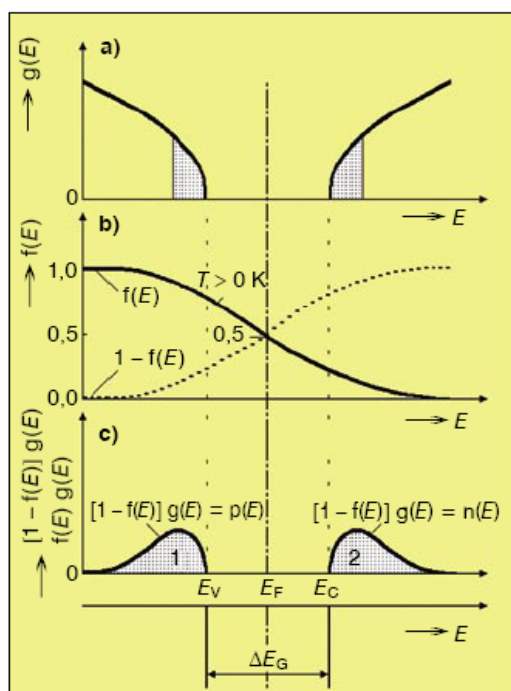
kde  $h$  je Planckova konstanta,  $\nu$  je frekvence a  $c$  je rychlost světla.

Obrázek 4.1 znázorňuje důležité charakteristiky vlastního polovodiče. V případě a) je na obrázku znázorněna funkce  $g(E)$ , která představuje hustotu stavů, tedy počet stavů na jednotkový interval energií, ve valenčním a vodivostním pásu v závislosti na energii.

V případě b) je znázorněna takzvaná rozdělovací funkce  $f(E)$ , která udává pravděpodobnost obsazení stavu s energií  $E$  elektronem. Hodnota  $1 - f(E)$  je pravděpodobnost neobsazení stavu elektronem. Z obrázku lze vyčíst, že pravděpodobnost toho, že bude částice nabývat energii odpovídající Fermiho hladině, je 0,5. Elektronů se řídí Fermiho-Diracovou statistikou, protože patří do skupiny částic zvaných fermiony. Znázorněnou rozdělovací funkci je možné matematicky popsat vztahem (4.2) ve tvaru

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad (4.2)$$

kde  $k$  je Boltzmanova konstanta a  $T$  je absolutní termodynamická teplota. V případě c) funkce  $f(E)g(E) = n(E)$  udává koncentraci elektronů ve vodivostním pásu a funkce  $1 - f(E)g(E) = p(E)$  udává naopak koncentraci děr v pásu valenčním. Plochy pod křivkami 1 a 2 jsou úměrné těmto koncentracím. U vlastního polovodiče mají tyto plochy stejnou velikost [9].



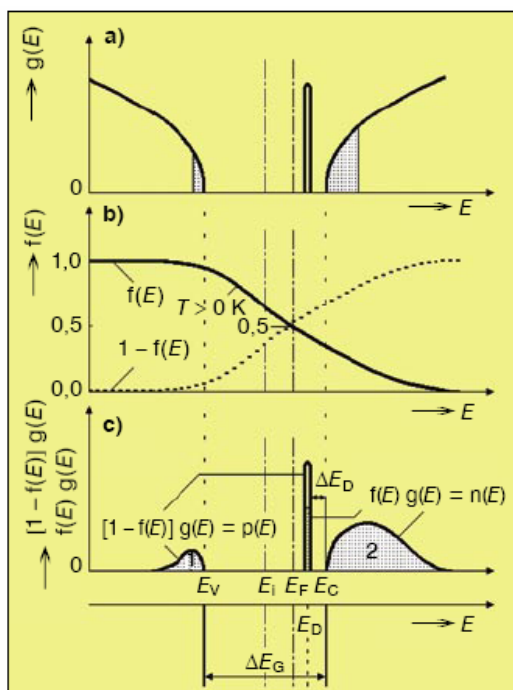
Obrázek 4.1 : Model elektronů a děr vlastního polovodiče [9]

### 4.3 Polovodič typu N

Nahradíme-li některé atomy v krystalu křemíku jinými atomy prvku páté skupiny Mendělejevovy tabulky prvků, například As, P či Sb, které mají pět valenčních elektronů,

budou čtyři z nich vázány kovalentní vazbou s jím nejbližšími atomy křemíku. Pátý elektron zůstane jen slabě vázán k atomu příměsi. Polovodič, který vznikne dopováním tímto způsobem nazýváme polovodič typu N (negative). Dodáme-li již relativně malá množství energie, dojde k odtrhnutí toho pátého elektronu a stává se uvnitř krystalu volně pohyblivým. Takovéto pětimocné atomy nazýváme donory, protože dodávají volné elektrony. V energetickém schématu se přítomnost takovéto příměsi projeví tak, že vzniknou lokální energetické hladiny ležící v zakázaném pásu poblíž dolní hladiny vodivostního pásu  $E_c$ .

Obrázek 4.2 znázorňuje analogické závislosti, které byly uvedeno u vlastního polovodiče výše.  $E_d$  značí donorovou hladinu energie. Energie nutná k přechodu elektronu z této hladiny do vodivostního pásu je relativně nízká, přibližně  $\Delta E_D \approx 0,012$  eV. Elektron může tedy snadno přejít do vodivostního pásu i při pokojové teplotě, tomu odpovídá dodaná tepelná energie  $kT = 0,025$  eV. U části b) lze vidět, že hladina Fermiho energie je posunuta směrem k vyšším energiím. Donorové atomy jsou při pokojové teplotě ionizovány a koncentrace děr ve valenčním pásu. U polovodiče typu N je plocha 2 větší než plocha 1, jak lze vidět na obrázku v části c) [9].



Obrázek 4.2 : Model elektronů a děr u polovodiče typu N [9]

## **4.4 Polovodič typu P**

Nahradíme-li některé atomy v krystalu křemíku jinými atomy prvku třetí skupiny Mendělejevovy tabulky prvků které mají tyto příměsi pouze tři valenční elektrony, nebude jedna vazba těchto atomů zaplněna a bude se chovat jako díra. Těmito prvky mohou být například B, Al či Ga. Do nezaplňené vazby může přeskočit elektron ze sousedního atomu a díra se pak bude pohybovat krystalem. Polovodič dotovaný tímto způsobem se nazývá polovodič typu P (positive). Příměsi tvořící záchytná centra pro elektrony nazýváme akceptory. V energetickém schématu se toto projeví tak, že vznikne energetická hladina  $E_A$  v zakázaném pásu poblíž horního okraje valenčního pásu. Na této hladině se mohou zachytit elektrony přeskokem z valenčního pásu, pokud je dodána energie  $\Delta E_A$ , kde po nich zůstává díra. Navenek je pak taková atom akceptoru záporně nabitý, protože má o jeden elektron více. Tvoří tedy pevně vázaný záporný náboj. Díra, která tímto vznikne ve valenčním pásu, je uvnitř krystalu volně pohyblivá. V polovodiči typu P je tedy koncentrace děr vyšší než koncentrace volných elektronů. Hladina Fermiho energie je pak posunuta směrem k nižším energiím [9].

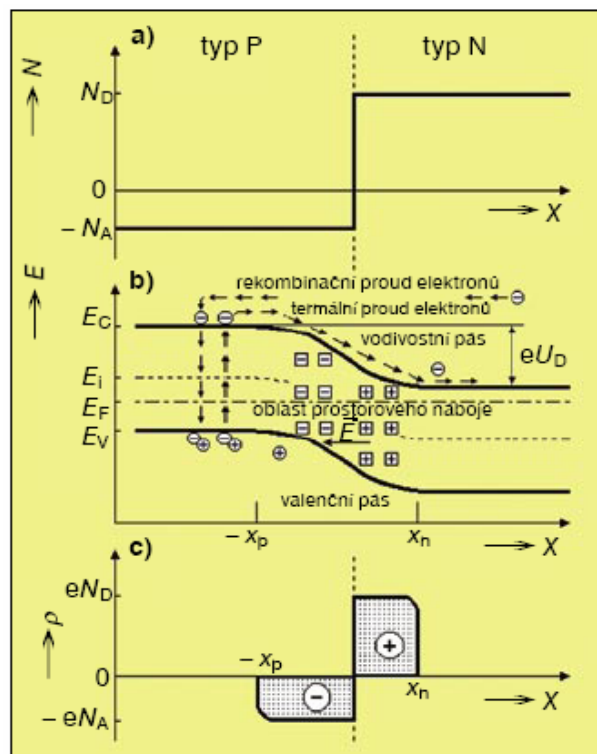
## **4.5 Nehomogenní polovodič**

Pokud se v krystalu nachází nehomogenní koncentrace příměsí, tedy některá oblast je dopovaná více a jiná oblast zase méně stejným nebo opačným typem příměsí, volné elektrony a díry pak mají tendenci dle zákonitostí difúze unikat z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací a vytvořit tak rovnoměrné rozložení. Uniknou-li volné nosiče z některých oblastí, zůstanou po nich na původních místech pevně vázané náboje ionizovaných příměsí s opačným znaménkem tvořící prostorový náboj. Uvnitř krystalu poté vznikají silná lokální elektrická pole, přestože se krystal navenek jeví jako elektricky neutrální. Díky těmto polím je pak zabráněno unikaní volných nosičů z míst s vyšší koncentrací a systém se ustálí v rovnovážném stavu [9].

## **4.6 Přechod PN**

Přechod PN je speciálním případem rozložení příměsí. Vzniká tehdy, jestliže je část krystalu dopována pomocí příměsí jako polovodič typu P a sousední část krystalu pomocí příměsí jako polovodič typu N. Jak je naznačeno na obrázku 4.3 a), v místě přechodu je pak

gradient koncentrace volných nosičů  $N$  ve směru přechodu, který je ztotožněn se směrem osy  $x$ ,  $N_D$  značí koncentraci donorů a  $N_A$  koncentraci akceptorů. Část volných elektronů přejde z oblasti typu P do oblasti typu N a část děr ve směru opačném. V polovodiči typu N pak pevně vázané náboje ionizovaných příměsí vytváří oblast kladného prostorového náboje viz. Obrázek 4.3 c). Vzniká mezi nimi elektrické pole bránící dalšímu toku volných nosičů. Aby byla hladina Fermiho energie v rovnovážném stavu vyrovnána po celém krystalu, dochází k ohybu pásů v místě přechodu. Ideální stav je znázorněn na obrázku 4.3 b). Šířku přechodu značí symboly  $x_p$  a  $x_n$ . Difuzní napětí  $U_D$  je potenciálový rozdíl mezi různě dopovanými oblastmi.



Obrázek 4.3 : Model přechodu PN [9]

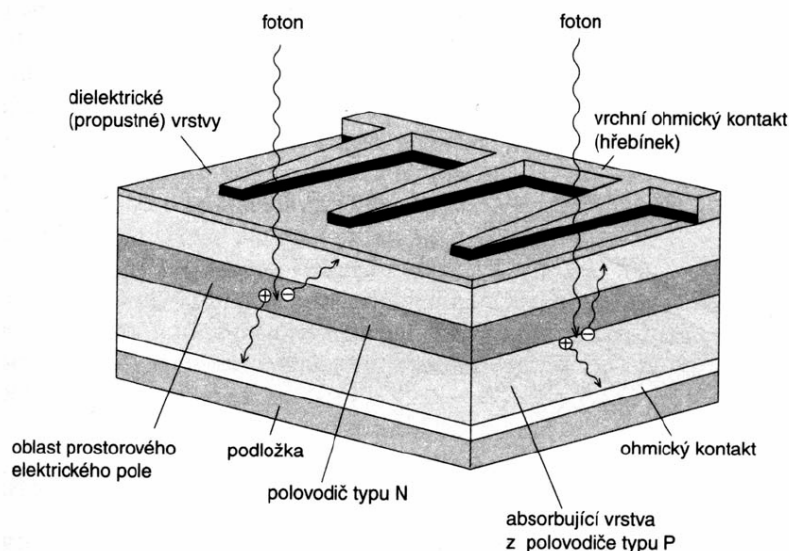
Takto popsany PN přechod může být jednoduchou polovodičovou diodou. V celém objemu polovodiče při teplotě  $T > 0$  K dochází ke generaci i rekombinaci elektronů a děr, tedy systém v rovnovážném stavu se tedy nachází ve stavu dynamické rovnováhy. Přechodem PN tedy tečou proudy oběma směry. Takto se chovají jak proudy elektronů tak proudy děr. Pokud mají některé elektrony v polovodiči typu N vyšší energii, než jaká odpovídá potenciálové bariéře difuzního napětí  $U_D$ , mohou pak tyto elektrony přecházet přes přechod PN do polovodiče typu P, a tam následně rekombinovat s nezaplněnými dírami. Takový proud elektronů se nazývá rekombinační. Oproti tomu jsou v polovodiči typu P generovány páry volných elektronů a děr. Volné elektrony jsou pak v elektrickém poli přechodu PN

urychleny směrem do polovodiče typu N a vzniká tak difuzní proud. Tento proud se také někdy označuje termální. Pokud není přiloženo vnější napětí, rekombinační a difuzní proudy se sobě rovnají a navenek se nijak neprojevují. Pokud ale připojíme k uzavřenému elektrickému vnější napětí, dochází k porušení rovnováhy. V případě, že je kladné znaménko na straně polovodiče typu P, dojde ke změně zakřivení pásů, snížení potenciálové bariéry  $U_D$  o hodnotu  $\Delta V$  a tím převládne proud elektronů ve směru do polovodiče typu P a proud děr ve směru obráceném. Přechod PN je potom orientován v propustném směru. Pokud je vnější napětí přiloženo s opačnou polaritou, dojde k navýšení potenciálové bariéry  $U_D$  a tím se zmenší rekombinační proud. Začne převládat proud difuzní, který je však v důsledku nízké koncentrace elektronů v polovodiči typu P menší. Přechod PN je potom orientován v závěrném směru [9].

## 5 Funkce solárních článků

Je-li přední strana článku vystavena dopadu slunečního záření, začnou se v křemíku generovat kladné a záporné náboje. Náboje jsou separovány jakmile dosáhnou polovodičového přechodu. Elektrony v  $N^+$  a kladné náboje v základním P materiálu. Bez rozlišování typu solárního článku se tedy v podstatě vždy jedná o velkoplošnou polovodičovou diodu s jedním nebo více PN přechody. Běžně se dnes vyrábějí články s rozměry nepřesahujícími 20cm a s tloušťkou do 150 - 180  $\mu\text{m}$ . Přední strana solárního článku je uzpůsobena tak, aby docházelo k co nejmenším optickým ztrátám. Ty jsou způsobeny neúplnou absorpcí záření a odrazy. Převážná většina solárních článků je konstruována tak, že má přední a zadní kontakt. Tyto kontakty slouží k připojení sběrných vodičů. Ukázka konstrukce běžně vyráběného solárního článku je na obrázku 5.1.

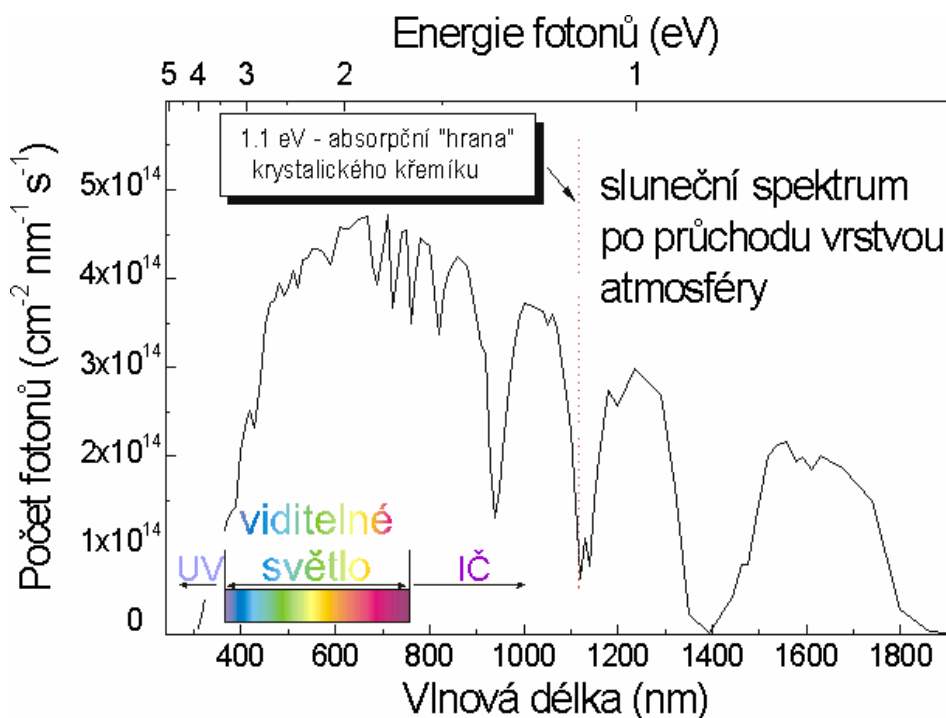




Obrázek 5.1: Řez solárním článkem [6]

## 6 Konstrukce křemíkových solárních článků

Jako nejvhodnější materiál pro fotovoltaiku se jeví křemík. Je tomu tak hned z několika důvodů, je k dispozici prakticky v neomezeném množství (zhruba 1/3 zemské kůry je tvořena oxidem křemičitým), není jedovatý a nemá tedy nepříznivý vliv na životní prostředí. Zároveň se podařilo velmi dobře zvládnout technologické operace potřebné k vytváření křemíkových struktur. Křemík absorbuje pouze světlo o vlnové délce kratší než než 1  $\mu\text{m}$ . Tomu odpovídají fotony o energii větší než 1,1 eV. Je to tedy část infračerveného spektra, celé viditelné a ultrafialové spektrum. Dochází tedy k absorpci větší části z celého slunečního spektra. Na obrázku 6.1 je znázorněno spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou a absorpční hrana křemíku. Dopadne-li na křemík foton s energií menší než 1,1 eV prochází skrz a není absorbován. Naopak fotony s energií větší než 1,1 eV jsou v křemíku absorbovány a generují kladné a záporné náboje. Energetický rozdíl mezi šířkou zakázaného pásu je přeměněn na teplo a to je hlavním důvodem, proč se teoretická účinnost křemíkových solárních článků pohybuje okolo 30%. Vyšší teoretické účinnosti je možné dosáhnout u článků složených z různých materiálů a s různou absorpční hranou nebo koncentrací světla (koncentratorové solární články), která logaritmičtě zvyšuje získané napětí. Elektrické vlastnosti křemíku (odstup mezi pásmy, pohyblivost nosičů náboje) umožňují jeho využití v oblasti vysokých výkonů a při všech na Zemi běžně se vyskytujících teplotách [2].

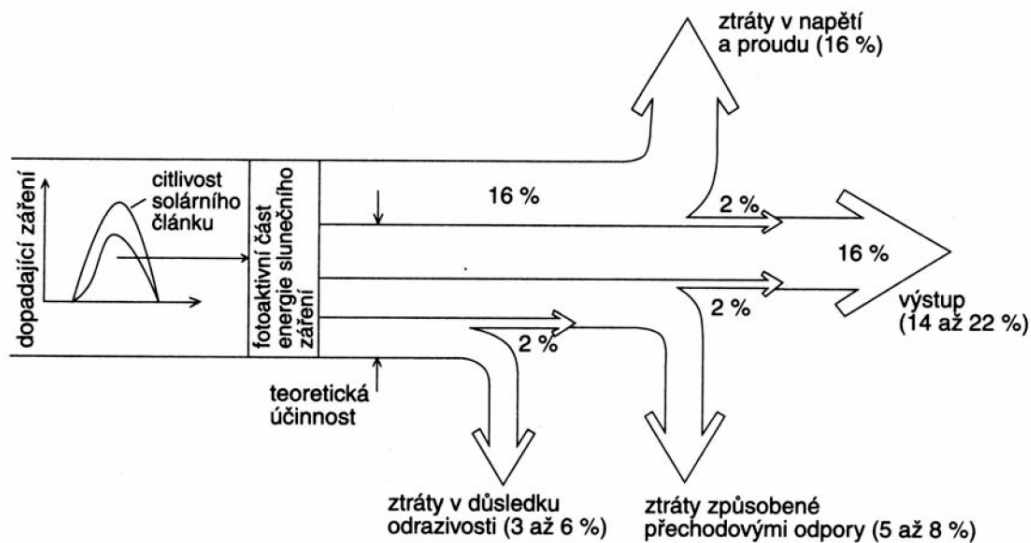


Obrázek 6.1 : Spektrum slunečního záření a absorpční hrana křemíku [2]

## 7 Vývoj solárních článků

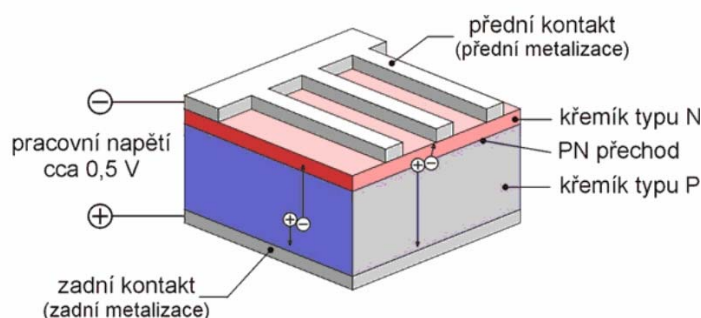
### 7.1 Články první generace

Od počátku padesátých let postupně narůstala účinnost solárních článků a to díky optimalizaci polohy PN přechodu a nalezením základních principů konstrukce a technologie. V současnosti rozlišujeme tři generační stádia fotovoltaiky. Do první generace fotovoltaické články, které využívají jako základ křemíkové desky. V dnešní době patří mezi nejrozšířenější technologií na trhu (cca 90 %). V sériové výrobě se dosahuje poměrně vysoké účinnosti přeměny a to 14 až 19 %, speciální struktury až 24 %. Jejich výroba je relativně drahá především z důvodu drahého vstupního materiálu, kterým je krystalický křemík. Na celkovou účinnost má vliv několik faktorů jak je vidět na obrázku 7.1 .



Obrázek 7.1: Celkové ztráty solárního článku [6]

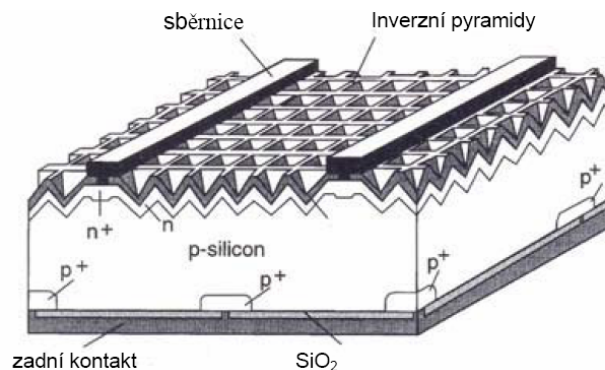
Za účelem minimalizace odrazů se solární články opatřují různými antireflexními vrstvami. U křemíku činitel odrazu pro viditelnou oblast spektra záření přesahuje 30% a použitím těchto materiálů je možné snížit odrazivost až o 20%. Používají se organické i anorganické materiály. Z anorganických jsou to například  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ . K organickým antireflexním materiálům patří například Mylar, Kapton nebo Aclar. Tyto konstrukce se využívaly až do počátku sedmdesátých let. Základní konstrukce článků této generace je na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Konstrukce článku s rovinným povrchem [7]

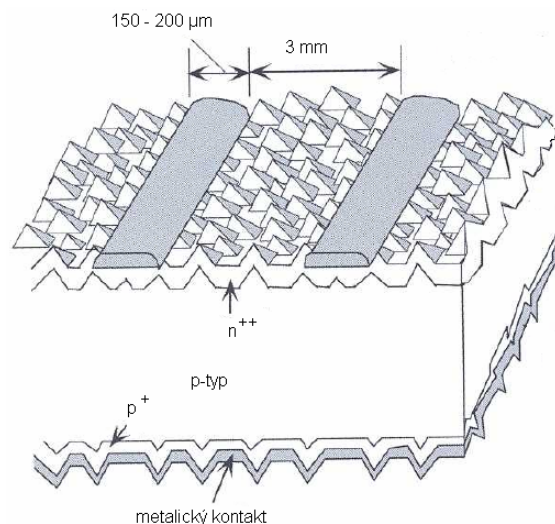
Další z možností jak snížit odrazivost povrchu je vytvoření speciální povrchové struktury. Využitím selektivního leptadla se na povrchu vytvoří textura v podobě malých pyramid. Tyto pyramidky pak dopadající záření částečně odráží směrem dolů a umožní tak

větší části záření proniknout do článku. V roce 1994 byla realizována struktura PERL (obrázek 7.3) s minimální odrazivostí. Tato struktura posunula účinnost solárních článků k hranici 24%.



**Obrázek 7.3 : Struktura PERL [2]**

Dalším technologickým pokrokem bylo nahrazení vakuově deponovaných (napařovaných či napařovaných) kontaktů. Místo nich se začala využívat technologie kontaktování sítotiskovou metodou. Tato technologie přinesla výrazné zjednodušení a zlevnění výroby článků (odstranění fotolitografie). V současnosti se používá struktura fotovoltaických článků znázorněná na obrázku 7.4.



**Obrázek 7.4 : Článek s kontakty vytvořenými sítotiskovou metodou [2]**

Texturovaný povrch pro snížení reflexe a zvýšení „light trapping“ efektu je vytvářen využitím anizotropního leptání křemíku na rovině <100>. Pro pasivaci povrchu křemíku a snížení reflexních ztrát se použije vrstva oxidu, případně nitridu křemíku. Spodní kontakt

slouží jako zpětný reflektor. Stále se vyvíjejí nové způsoby úpravy povrchů. Jednou z nich je například metoda Spin – coating. Rotující křemíková deska je pokryta roztokem křemíkových nanočástic. Po zaschnutí vznikne povrch rovnoměrně pokrytý částicemi křemíku, jejichž velikost je srovnatelná s vlnovou délkou světla.

V počátcích výroby fotovoltaických článků se využíval především monokrystalický křemík získávaný pomocí metody Czochralského. Kelímek z čistého křemenného skla se naplní polykrystalickým křemíkem a v uzavřené nádobě dojde při teplotě převyšující 1420 °C k roztavení náplně. Tavenina se uvede do kontaktu s očkovacím krystalem upevněným ve svislé poloze. Následným odvodem tepla křemík na jeho konci tuhne a krystal tak roste [3].

## **7.2 Články druhé generace**

Hlavní impuls pro rozvoj článků druhé generace byla v první řadě snaha o snížení výrobních nákladů úsporou drahého základního materiálu, tedy křemíku. Od článku první generace se odlišují především 100 krát až 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou (thin-film). Mezi její představitele je možné zařadit např. články z amorfního a mikrokystalického křemíku. Využívá se taktéž silicon-germania, silicon-karbidu a směsné polovodiče označované jako CIS struktury z materiálů jako Cu, Ga, In, S, Se. Tímto bylo dosaženo úspory materiálu a došlo ke snížení nákladů ve výrobním procesu ve srovnání s články první generace. Obvykle je však dosahováno nižší účinnosti. Ta se v sériové výrobě pohybuje obvykle pod 10%. Značnou výhodou tenkovrstvých článků je možnost volby substrátu na něž se tenkovrstvé struktury deponují. Zároveň je při použití flexibilních materiálů, ať už jsou to materiály organické, kovové či textilní folie i značně širší aplikační sféra. Vývoj v této oblasti se zaměřuje na navýšení depoziční rychlosti  $v_d$  na hodnoty zhruba 10 nm/s. Těchto hodnot je možné dosáhnout při takzvaném vysokotlakém ochuzeném režimu (HPD), přičemž současné navýšení tlaku reaktivní atmosféry a výkonu umožňuje zachovat elektronickou kvalitu vrstev. Při úpravě depozičního systému může být tlak navýšen až do hodnot atmosferického tlaku. Takto je možno připravit vrstvy s vysokou kvalitou při depoziční rychlosti  $v_d \sim 100$  nm/s. I při tomto tlaku je stále nutné využívat čerpací systémy. Články druhé generace se v komerčním prodeji objevily v polovině osmdesátých let [6].

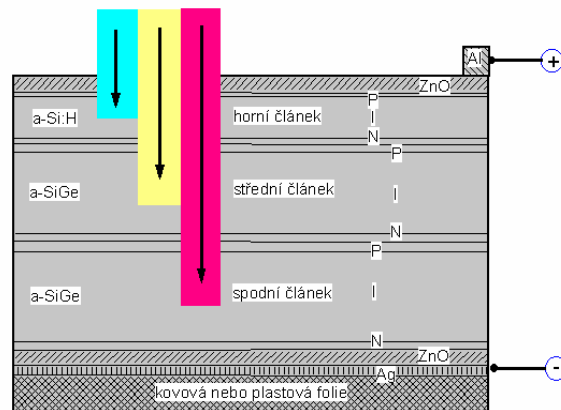
### 7.3 Články třetí generace

Co se týče článků třetí generace, jedná se zde spíše o určitý směr dalšího výzkumu, než o nějaké konkrétní zástupce. Vývoj směřuje k překročení Shockley-Queisserovy hranice, jejíž podstatou je předpoklad, že 1 foton 1 využitelný exciton o energii, která se rovná zakázanému pásu. Zbylá energie se přemění na teplo. Existuje několik směrů, kterými se může budoucí výzkum ubírat z nichž je možné zmínit následující:

- tandemové solární články
- články s vícenásobnými pásy
- články využívající termofotovoltaické přeměny, kde je absorbér současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, nahrazení absorbérů elektroluminiscencí
- články, které by využívaly kvantové jevy v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vzniklé samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články

Jednou ze zmíněných variant, která se již dočkala realizace jsou tandemové solární články. Jedná se o vícevrstvé struktury. Dvojvrstvé – tzv. tandemy a trojvrstvé články. Každá substruktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a tím dochází k maximalizaci energetické využitelnosti fotonů. Jedním z příkladů tandemového solárního článku je struktura, která se skládá z p-i-n přechodu amorfního křemíku (a-Si:H) a p-i-n přechodu mikrokrystalického křemíku ( $\mu\text{c-Si:H}$ ). Amorfní křemík má vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté části spektra. Mikrokrystalický křemík má navíc dobrou absorpci i v oblasti červeného a infračerveného spektra. Současně se dá tento materiál připravit při nízké teplotě, obvykle 200° C. Je tedy možné jej nanášet na levné podložky, například sklo, některé plastické hmoty nebo kovová fólie. To ve výsledku umožní snížit cenu slunečního článku. Mikrokrystalický křemík je možné nahradit i „slitinou“ křemíku s germaniem. Zvolené poměry obou materiálů stanovují jejich optické a elektrické vlastnosti. Tento materiál se využívá pro trojvrstvé solární články, přičemž dva spodní články jsou vyrobeny s různou koncentrací Si a Ge. Základní podmínka dobré funkce vícevrstvých článků je, aby všechny články generovaly stejný proud. Pokud tomu tak není, limituje horší z článků dosažitelnou účinnost. Výsledné napětí je dáno součtem napětí všech článků. Malé laboratorní články dosahují stabilní

účinnosti přes 13%. V hromadné výrobě dochází ve snaze dosažení co nejnižší ceny k zjednodušení některých technologických detailů a díky tomu účinnost v současnosti dosahuje 7-8%. Na obrázku 7.5 je zobrazena struktura tandemového solárního článku, pro zlepšení sběru fotogenerovaných nositelů je volena struktura p-i-n, to znamená že velká většina elektronů a děr je generována v oblasti silného vnitřního elektrického pole v intrinsické (i) vrstvě [2].

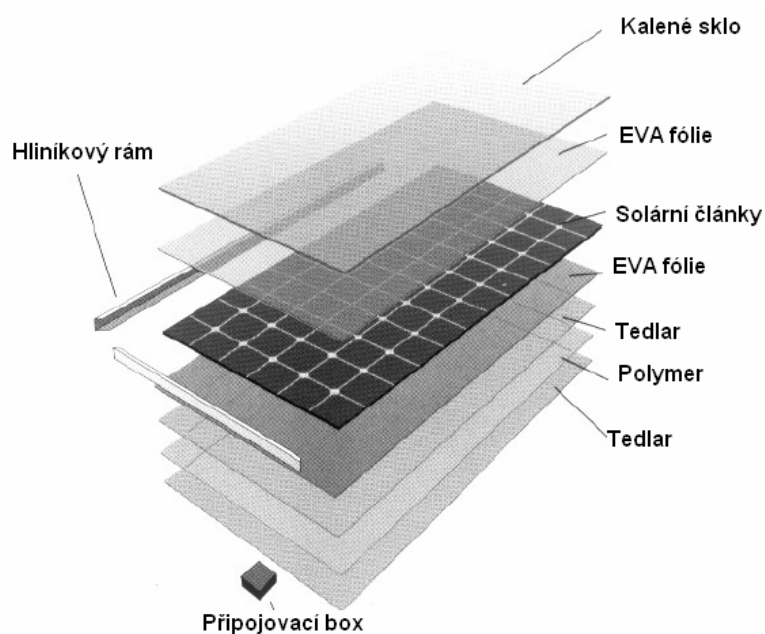


Obrázek 7.5: Tandemový solární článek [2]

## 8 Fotovoltaické moduly

Z důvodu křehkosti a také proto, že ve venkovním prostředí by kontakty článků podléhali korozi se solární články zapouzdřují do solárních modulů. Jednotlivé články se do solárních modulů skládají v sérioparalelní kombinaci. Je nutné, aby panel byl hermeticky zapouzdřen. Mechanická pevnost a odolnost je také jednou z důležitých vlastností panelu, protože někdy bývají moduly vystaveny drsným klimatickým podmínkám. Dochází-li k prudkým teplotním změnám, zvyšuje se riziko narušení vodivých spojů na solárních článcích. Z toho důvody bývají panely zpevněny prostřednictvím kovových nebo plastových rámců. Přední krycí materiál musí být schopen solární články ochránit i při případném silném krupobití. Maximální výkon panelu závisí na velikosti celkové plochy fotovoltaických článků. Běžná konstrukce fotovoltaického panelu je následující. Na přední straně fotovoltaického panelu se nachází temperované (tzv. kalené) sklo. Předností těchto skel je jejich vysoká odolnost proti nárazu. Na sklo se položí fólie z etylvinylacetátu (EVA) a na tu se skládají a propojují fotovoltaické články. Články jsou znovu překryty další EVA fólií a zadní stěna je zpravidla

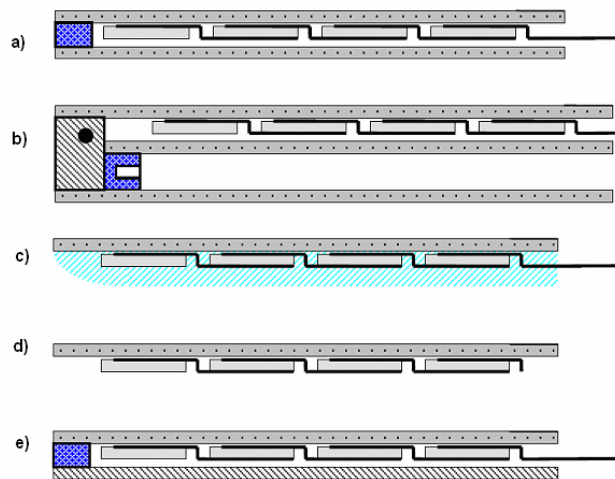
tvořena laminátovou kompozicí Tedlar (PVF) – Polymer –Tedlar. Tato struktura je naznačena na obrázku 8.1. Poté je z modulu vyčerpán vzduch, který se nacházel mezi těmito vrstvami a panel se zahřeje nad teplotu tání EVA fólie. Teplotním zpracováním dojde k roztečení fólie a ta následně zalije fotovoltaické články v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Nakonec jsou panely orámovány a zatmeleny do hliníkových profilů. Hotové fotovoltaické panely se utěsní proti vodě a jiným nečistotám. Životnost kvalitních panelů na bázi krystalických polovodičů bývá až 30let.



**Obrázek 8.1: Struktura solárního panelu [4]**

Existuje několik druhů solárních panelů, jejich konstrukce se většinou podobá základní konstrukci popsané výše. Několik nejběžnějších druhů solárních modulů je na následujícím obrázku 8.2. U varianty a) je solární panel s oboustranným zasklením, b) u této varianty je použito izolační dvojsklo, c) zadní strana těchto modulů je zalévána do pryskyřice, d) v tomto případě je zadní strana laminována folií, e) u této konstrukce je na zadní stranu použit netransparentní materiál [4].





Obrázek 8.2: Základní druhy solárních modulů [4]

Dalším typem solárních panelů jsou tzv. koncentrátorové systémy. V principu se snaží o soustředění slunečního záření na solární články prostřednictvím čoček nebo zrcadlových ploch. Při použití Fresnellovy lineární čočky nebo bodové čočky může být koncentrace záření navýšena 10 krát až 500 krát. Pro tento typ modulů se využívají především křemíkové solární články s malou plochou. Použije-li se jiný materiál, například arsenid galia, je možné dosáhnout větší účinnosti a panely provozovat při vyšší teplotě. Nevýhodou v tomto případě je výrazně vyšší cena. Zrcadlové plochy se využívají ke zvýšení výkonu panelů. To je umožněno buď dosažením vyšší intenzity slunečního záření a nebo prodloužením doby vystavení panelu slunečnímu záření. Aby byly solární články neustále v ohnisku čoček, je nutné tyto moduly neustále orientovat na slunce. Tyto panely nejsou vhodné pro oblasti, ve kterých se často vyskytuje velká oblačnost [4].

## 9 Vliv zastínění

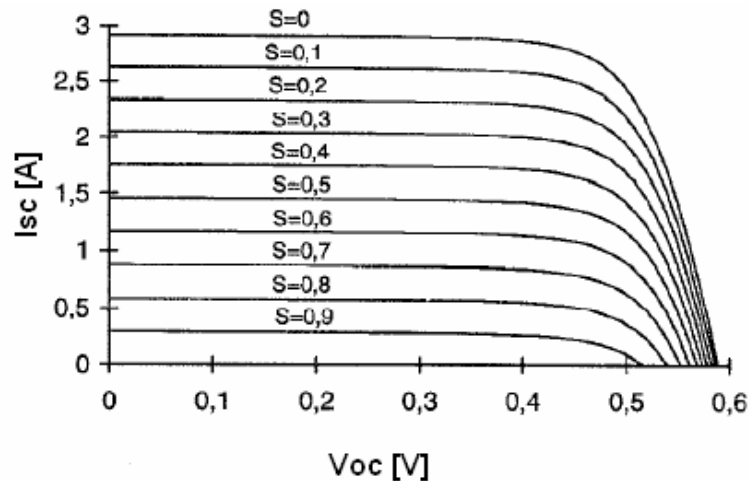
Výstupní charakteristiky solárních článků jsou značně ovlivněny pokud jsou jednotlivé články ozářeny různou úrovní. Zastínění solárního článku nejen ovlivní výstupní výkon, ale také mění hodnotu napětí naprázdno  $V_{oc}$ , hodnotu proudu nakrátko  $I_{sc}$ , faktor plnění FF a samozřejmě i výslednou účinnost panelu. Při lokálním zastínění některého z článků je ovlivněn ve výsledku výstup z celého panelu.

Při teoretických výpočtech se zavádí takzvaný faktor stínění  $S$ . Tento faktor se vypočítá z následujícího vztahu (9.1).

$$S = \frac{S_s}{S_c} \quad (9.1)$$

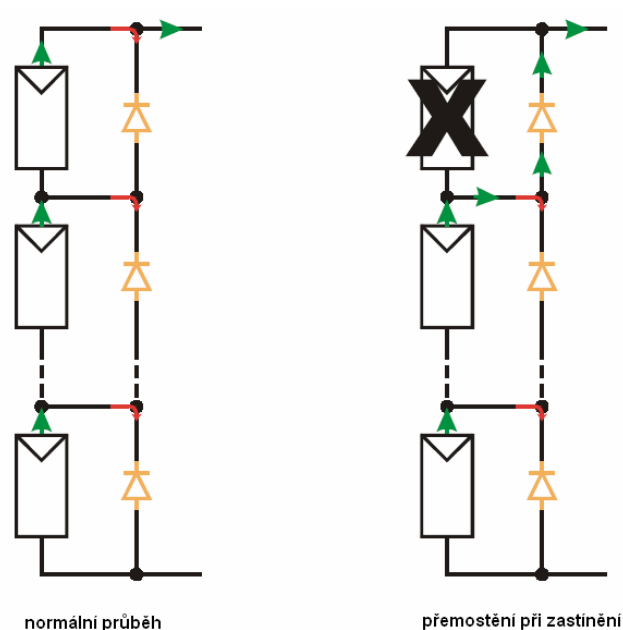
kde  $S_s$  značí plochu zastíněné části a  $S_c$  plochu celkovou.

Voltampérové charakteristiky článku s různým faktorem stínění  $S$  při teplotě 300 K a intenzitě záření  $1000 \text{ W/m}^2$  jsou znázorněny na obrázku 9.1.



**Obrázek 9.1: Voltampérová charakteristika solárního článku v při různém zastínění [8]**

Pokud dojde zastínění jednoho nebo více článků (větve stromů, antény, nečistoty), postižený solární článek se přestane dále chovat jako zdroj proudu, a naopak se stává spotřebičem. Nezastíněné články vnutí proud skrze tyto články a dochází k velkým ztrátám. Zároveň dochází k zahřívání, které může vyústit až k nevratnému poškození panelu. Aby se zabránilo tomuto problému, připojují se do řetězce solárních článků antiparalelně přemostovací (bypass) diody. Na obrázku 9.2 je zelenými šipkami znázorněn průběh proudu při normálních podmínkách a při zastínění.



**Obrázek 9.2: Použití přemost'ovacích diod**

Stejně jako každá jiná polovodičová součástka, tak i použité přemost'ovací diody způsobují určitý ztrátový proud v závěrném směru. Tento jev je znázorněn na předchozím obrázku prostřednictvím červených šipek. V normálních podmínkách se to projeví snížením výsledného proudu dodávaného solárními články. Ve výsledku tedy snižují účinnost solárního modulu. Tento ztrátový proud by měl být především při plném ozáření solárních článků co nejmenší. Částečné zastínění je výjimečný jev, kterému by mělo být pokud možno kompletně zabráněno nebo alespoň jeho průběh zredukován na co nejkratší časové periody. Přemost'ovací diody musí být odolné taky vůči přepět'ovým špičkám. Takovéto špičky se mohou objevit při montáži systému, když dojde například k odpojení kabelů a nebo při zásahu bleskem.

Existují určitá doporučení, které by měly přemost'ovací diody splňovat. Konečný výběr však hlavně záleží na typu solárních článků a provozních podmínkách, ve kterých se bude panel vyskytovat. Ve standardech IEC 61730-2 a IEC 61215 jsou popsány testy přemost'ovacích diod. Zkouší se v obvodu modulu po dobu jedné hodiny při teplotě okolí 75°C.

## **10 Diody**

### **10.1 Schottkyho dioda**

Schottkyho dioda je součástka využívající usměrňovací vlastnost přechodu MN. Jedná se o přechod kov (Metal) a polovodič typu N. V tomto přechodu nedochází k injekci minoritních nosičů náboje. Vedení proudu realizují pouze majoritní nosiči náboje, což přináší řadu výhod. V přímém směru mají Schottkyho diody menší úbytky napětí než přechod PN. Z polovodiče typu N přecházejí do kovu takzvané horké elektrony z vrcholu energetické bariéry. Tyto elektrony v kovu ztrácejí přebytek své energie. Schottkyho diody jsou tedy proto vhodné pro zpracování signálů s vysokými kmitočty. Jako materiál pro výrobu Schottkyho diod se nejčastěji volí křemík nebo GaAs. Schottkyho diody se využívají v aplikacích pro velmi vysoké frekvence. V průchozím směru jsou Schottkyho diody díky svým rychlým spínacím časům a malému napětí využívány ve spínačích s dobou sepnutí řádově jednotky ns. Malé napětí v přímém směru dovoluje využití Schottkyho diod i ve výkonové technice. Hlavním nedostatkem Schottkyho diod je malé závěrné napětí. Průrazné napětí se pohybuje od 10 až 150 V [10].

### **10.2 Germaniová dioda**

Germaniová dioda je založena na chování přechodu PN s difuzním napětím cca 0,2 V. Její voltampérová charakteristika závisí na teplotě přechodu. Výhodou germaniových diod je malý odpor v propustném směru. Nevýhodou bývá teplota přechodu, která se většinou pohybuje okolo 70°C. Další nevýhodou může být závěrné napětí, to se pohybuje okolo 400V.

### **10.3 Univerzální křemíkové diody**

Výhodou křemíkových diod je vysoká teplota na přechodu, která může být až 150°C. Závěrné napětí může dosahovat až 1500 V a mají nepatrný závěrný proud až  $10^{-8}$  A. Jejich nevýhodou je poměrně velký odpor v propustném směru, který omezuje jejich použití při malých napětích.

# 11 Experimentální část

## 11.1 Návrh

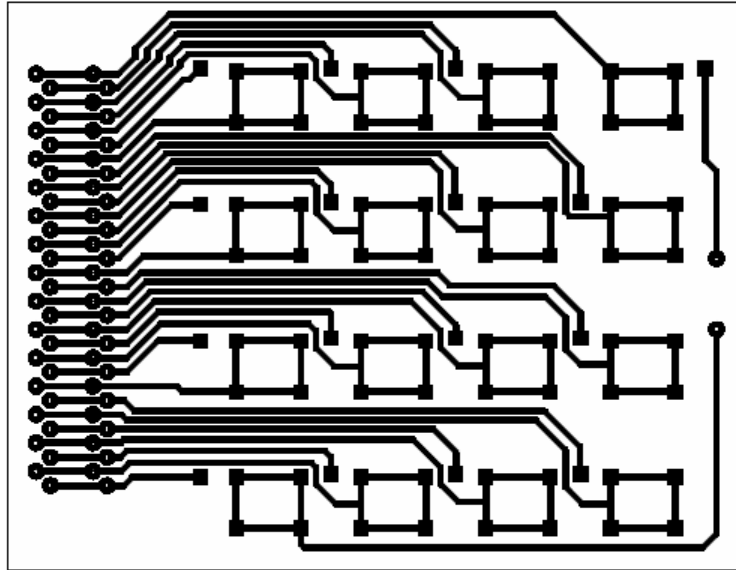
V experimentální části této práce byl navržen a sestaven solární modul, na kterém je možno studovat vliv zastínění solárních článků na celkové parametry solárního modulu. Po konzultaci s vedoucím práce bylo domluveno, že se panel bude skládat z 16 solárních článků. Zároveň bude panel umožňovat různě kombinovat jejich propojení. Každý článek bude možno přemostit pomocí diody. Bylo dohodnuto, že základem modulu bude deska plošného spoje, na kterou budou pájeny solární články. Byly použity řezy křemíkových solárních článků, bez texturace povrchu a se sítotiskovou metalizací. Rozměry řezů jsou 15 x 13 mm. Nízká účinnost řezů, která se pohybuje okolo 11%, je způsobena především ztrátami odrazem záření a také malými rozměry.

Parametry jednoho z použitých solárních článků jsou uvedeny v tabulce.

**Tabulka 11.1 : Parametry 1 řezu solárního článku**

Parameter	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [V]	$I_m$ [mA]	$U_m$ [V]	$P_m$ [mW]	FF	$\eta$ [%]
Hodnota	38,8	0,55	36,3	0,35	12,9	60,7	10,73

Plošný spoj byl navržen v návrhovém prostředí PADS. Bylo vytvořeno pouzdro s kontakty ve tvaru kontaktování spodní strany solárního článku. Vedle tohoto pouzdra byl přiveden kontakt umožňující připájení vrchního kontaktu solárního článku pomocí kovového pásku. U každého solárního článku byl vyveden vrchní i spodní kontakt k okraji desky, aby nedocházelo k nežádanému zastínění. Tyto kontaktní plošky slouží pro realizaci propojení solárních článků a pro připojení přemostovacích diod. Předloha pro výrobu plošného spoje je na obrázku 11.1.



Obrázek 11.1: Předloha pro plošný spoj

## 11.2 Použité diody

Pro přemostování solárních článků bylo zvoleno několik typů diod. První z nich je germaniová dioda 1N60. Její limitující parametry jsou v následující tabulce.

Tabulka 11.2: Parametry 1N60

U [V]	I [mA]	Pouzdro	Pracovní teploty [°C]	Ztráty [mW]
50	500	DO - 7	-65 .. 85	80



Obrázek 11.2: Germaniová dioda 1N60

Další diodou použitou při měření byla Schottkyho dioda BAT 46. Její limitující parametry jsou uvedeny níže.

Tabulka 11.3: Parametry BAT46

U [V]	I [mA]	Pouzdro	Pracovní teploty [°C]	Ztráty [mW]
100	150	DO - 35	-65 .. 125	150



**Obrázek 11.3: Schottkyho dioda BAT46**

Dále byla použita křemíková univerzální dioda BAV21. Její parametry dle specifikace jsou v následující tabulce.

**Tabulka 11.4: Parametry BAV21**

U [V]	I [mA]	Pouzdro	Pracovní teploty [°C]	Ztráty [mW]
250	250	DO - 35	-65 .. 175	500



**Obrázek 11.4: Univerzální dioda BAV21**

Další použitou diodou byla univerzální křemíková dioda 1N4936. Její parametry dle datasheetu jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tabulka 11.5: Parametry 1N4936**

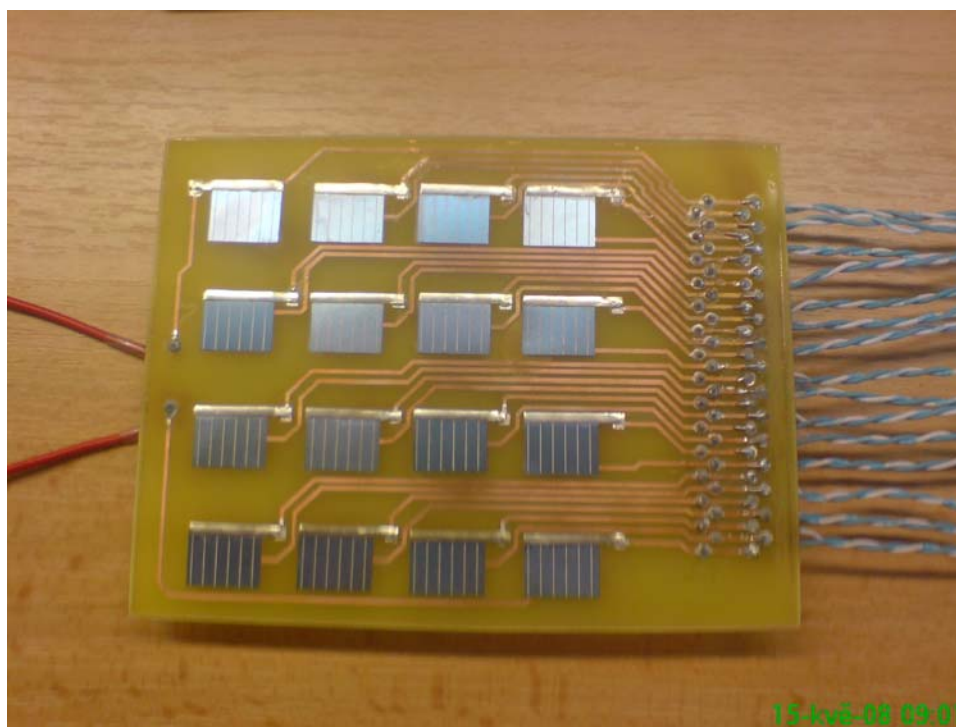
U [V]	I [mA]	Pouzdro	Pracovní teploty [°C]	Ztráty [mW]
400	1000	DO - 41	-65 .. 150	2500



Obrázek 11.5: Univerzální dioda 1N4936

### 11.3 Měření

Solární články byly pomocí pájecí pasty a horkovzdušné pájky připájeny na plošný spoj. Přemostovací diody se připojovaly pomocí nepájivého kontaktního pole. Jednotlivé články byly spojeny sériově, takže výsledný proud byl stejný jako proud jednoho článku a napětí bylo rovno součtu napětí všech článků. Hotový modul připravený pro měření je vidět na obrázku 11.6.

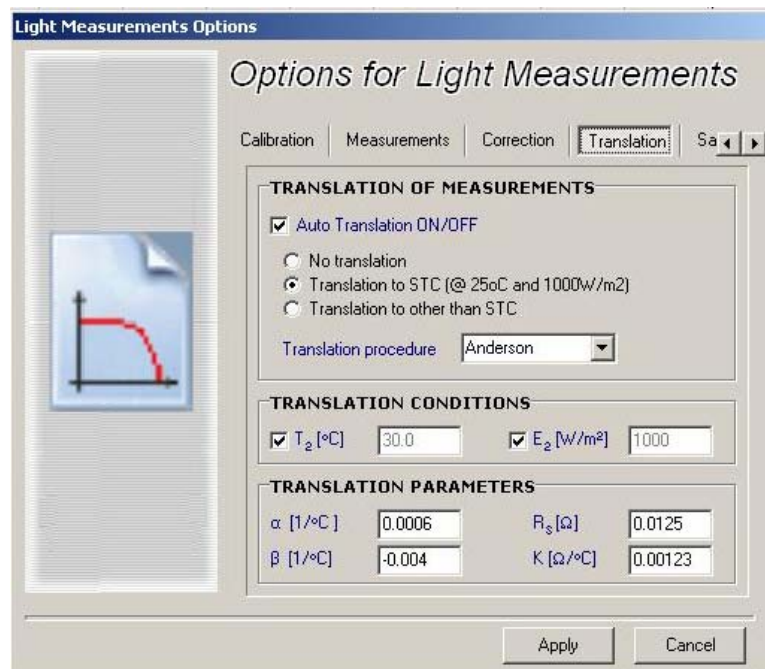


Obrázek 11.6: Hotový model pro měření



Měření probíhalo na solárním simulátoru společnosti Solartec s.r.o. v Rožnově pod Radhoštěm. Elektrické parametry se měří při spektrálním složení světla odpovídající slunečnímu spektru AM 1.5.

Měření bylo vyhodnocováno na počítači. Hodnoty parametrů byly na testeru korigovány automatickým přepočtem tak, aby přesně odpovídaly měření při intenzitě osvětlení  $1000 \text{ W/m}^2$  a teplotě  $25^\circ\text{C}$ . Bylo použita Andersonova překladační procedura. Nastavení překladače je vidět na obrázku 11.7.



Obrázek 11.7: Korekce naměřených hodnot

Byly měřeny následující elektrické parametry solárních článků :

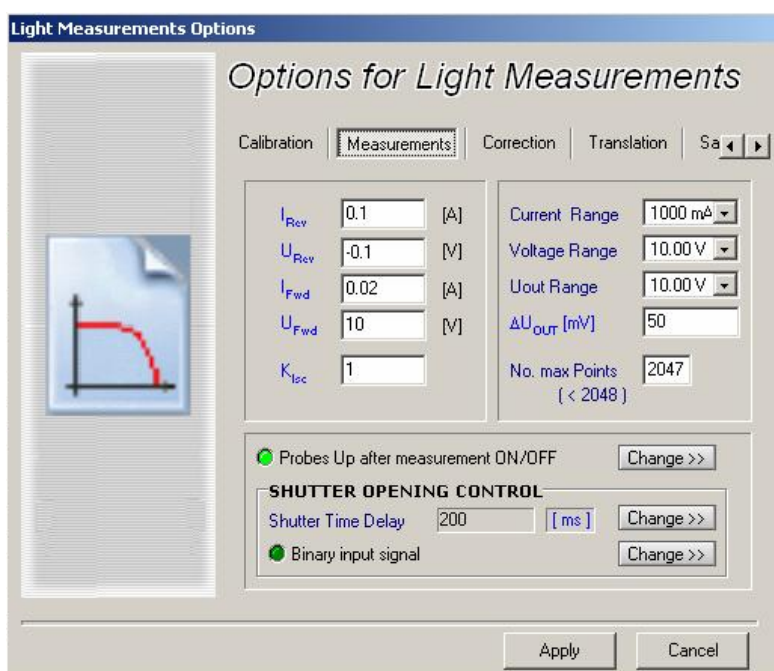
- **Zkratový proud**, tekoucí fotovoltaickým článkem při napětí  $0 \text{ V}$ . Tento parametr lze na solárním článku změřit pouze speciálním přístrojem. Běžně používané ampérmetry mívají vnitřní odpor kolem  $100$  miliohmů. Pokud bychom měřili takovým ampérmetrem, mohlo by být napětí na článku kolem  $300 \text{ mV}$ . Tento proud označujeme  $I_{sc}$ .
- **Napětí na solárním článku naprázdno**, je to napětí naměřené bez zátěže. Toto napětí označujeme  $U_{oc}$ .

- **Maximální výkon**, který je článěk schopen dodávat. Bod maximálního výkonu solárního článku se na charakteristice vyskytuje zhruba uprostřed ohybu. Zařízení, které odebírá energii ze solárních článků, by mělo zatěžovat tyto články takovým způsobem, aby články pracovaly právě v blízkosti tohoto bodu maximálního výkonu. Takto dojde k neoptimálnějšímu využití sluneční energie. Tento výkon označujeme  $P_m$ .
- **Proud**, při němž dodává solární článěk maximální výkon. Tento proud označujeme  $I_m$ .
- **Napětí**, při němž dodává solární článěk maximální výkon. Toto napětí označujeme  $U_m$ .
- **Fill Factor**. Tento parametr označujeme **FF**. Zjišťuje se výpočtem podle následujícího vzorce:

$$FF = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{sc} \cdot U_{oc}} \quad (8.1)$$

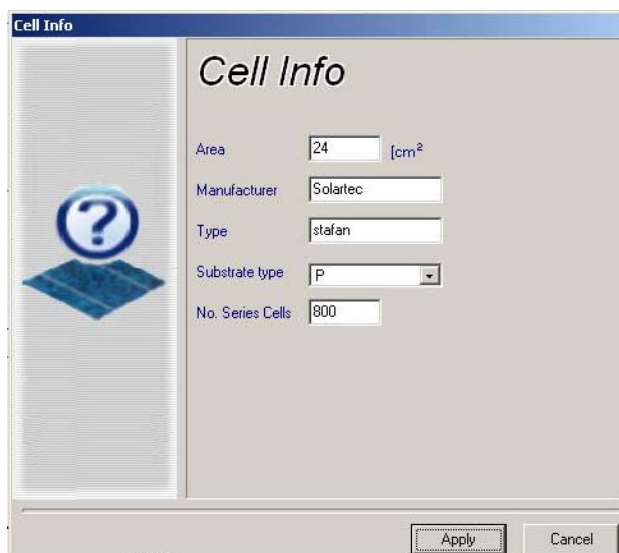
- **Účinnost solárního článku**. U solárních článků vyrobených z monokrystalického křemíku se pohybuje okolo patnácti procent. Značíme ji  $\eta$ .

Nastavení měřicích rozsahů je patrné z obrázku 11.8.



Obrázek 11.8: Nastavení rozsahů

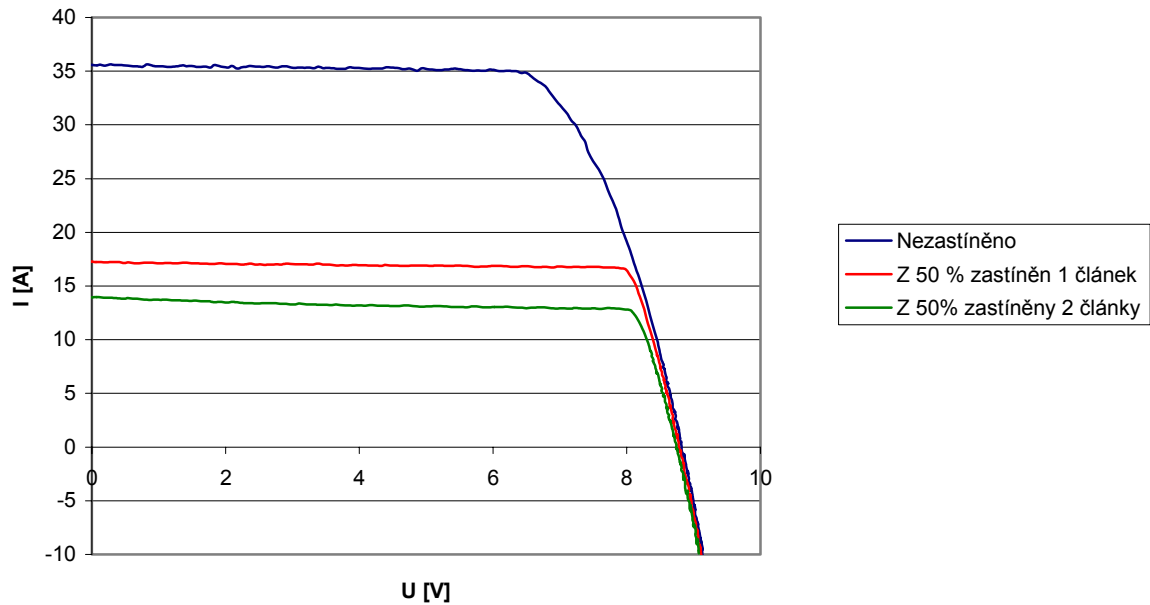
Zároveň bylo nutné před spuštěním samotného měření nastavit parametry měřených solárních článků. Důležitá je především celková plocha článků, která figuruje ve výpočtech.



Obrázek 11.9: Parametry solárních článků

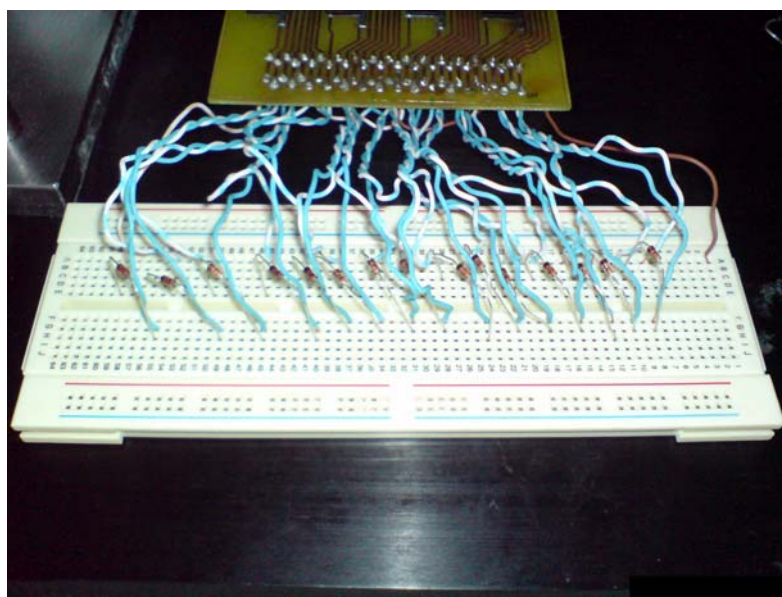
Samotné měření probíhalo v několika nastaveních. V prvním kroku nebyly připojeny přemostovací diody. Z naměřených hodnot je patrné, že zastínění významně ovlivňuje výstupní proud. Naměřené hodnoty byly pro větší názornost vyneseny do grafu viz obr. 11.10.

Je patrné, že pokud je částečně zastíněn pouhý jeden článek, klesá proud dodávaný celým modulem až o polovinu.



Obrázek 11.10 Průběhy bez připojených přemost'ovacích diod při plném osvětlení (modrá), při zastínění 1 článku(zelená) a při zastínění 2 článků (červená).

V dalších měřeních, již byly použity přemost'ovací diody. Pro každou diodu bylo proměřeno několik variant. Solární články byly přemostěny diodami skrze nepájivé kontaktní pole jak je vidět z obrázku 11.11.

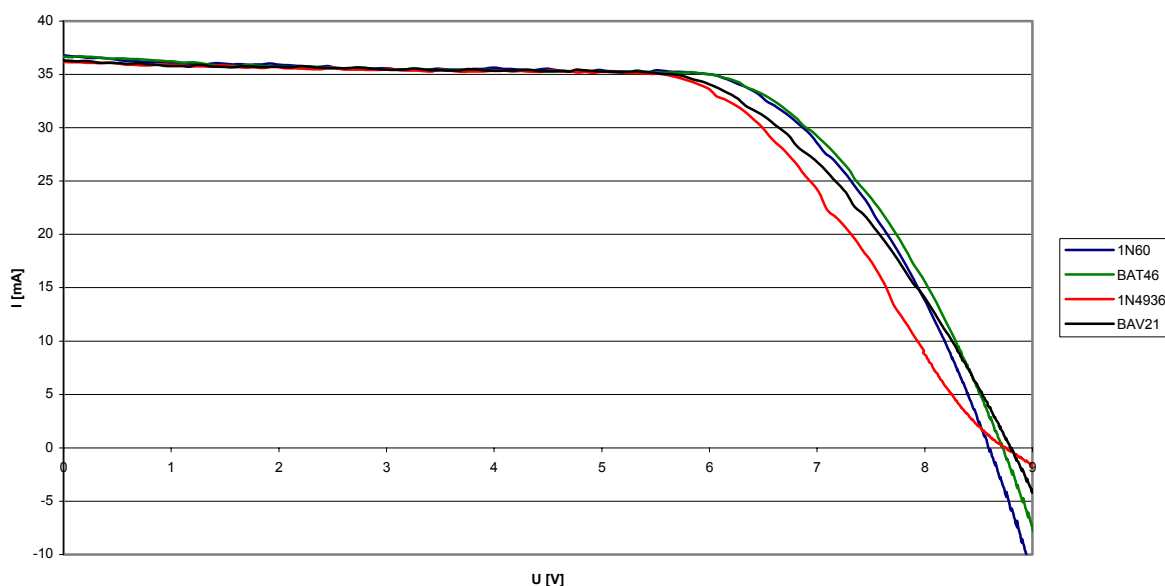


Obrázek 11.11 : Připojení diod prostřednictvím nepájivého pole

První varianta byla vždy pouze s připojenými přemost'ovacími diodami, ale při plném osvětlení. Nejdříve byly přemost'ovací diody připojeny tak, že každý solární článek přemost'ovala jedna dioda. Z charakteristiky je patrné, že připojením přemost'ovacích diod dojde k určitým proudovým ztrátám. Tyto ztráty nejsou nijak významné, ale ve výsledku snižují účinnost solárního modulu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.6. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.12.

**Tabulka 11.6: Naměřené hodnoty bez zastínění**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	36,8	8,59	33,7	6,36	214,1	67,8	8,92
BAT46	25	36,7	8,72	33,6	6,41	215,3	67,3	8,97
1N4936	25	36,2	8,75	33,4	6,04	201,4	63,6	8,39
BAV21	25	36,3	8,79	33,2	6,18	204,9	64,2	8,54



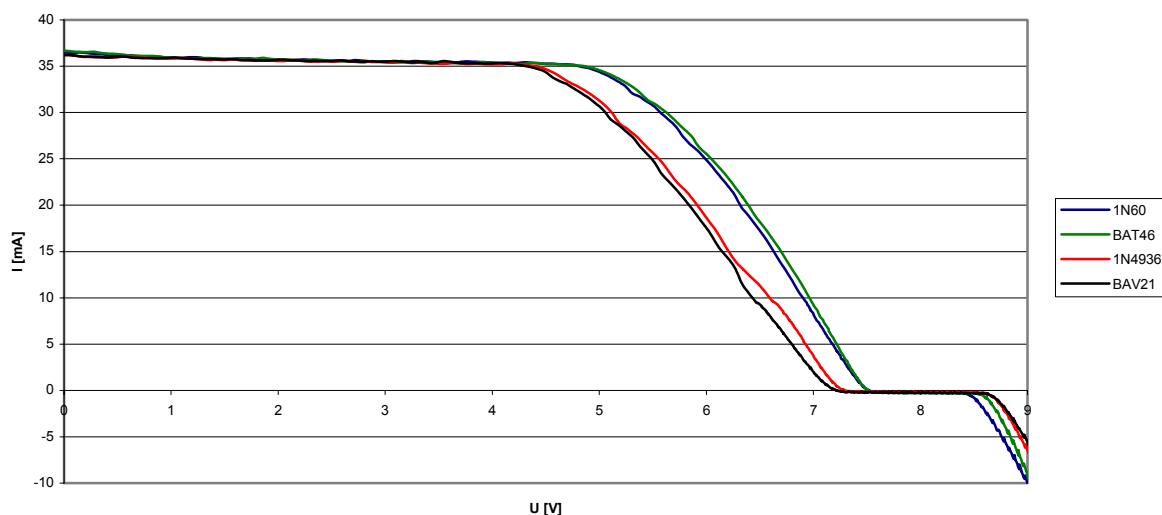
**Obrázek 11.12 : Průběhy s připojenými přemost'ovacími diodami při plném osvětlení 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

V dalším měření byl zastíněn 1 z 16 článků. Článek byl zastíněn ze 100 % a pokud by nebyly použity přemost'ovací diody, tekla by modulem jen velice nízký proud. Opět byly přemost'ovací diody připojeny tak, že každý solární článek přemost'ovala jedna dioda. Zastíněním jednoho článku klesne výstupní napětí modulu o hodnotu napětí na článku a

úbytek napětí na diodě. Solární modul však dodává stejný proud. Účinnost poklesla zhruba o 1,5 - 2%. Jako nejvýhodnější se jeví diody 1N60 a BAT46. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.7. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.13.

**Tabulka 11.7 : Naměřené hodnoty při zastínění 1 článku**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	36,5	7,52	33,4	5,16	172,5	62,9	7,19
BAT46	25	36,6	7,52	33,5	5,21	174,2	63,3	7,26
1N4936	25	36,2	7,36	33,2	4,76	157,8	59,3	6,57
BAV21	25	36,2	7,23	33,1	4,69	155,5	59,5	6,48

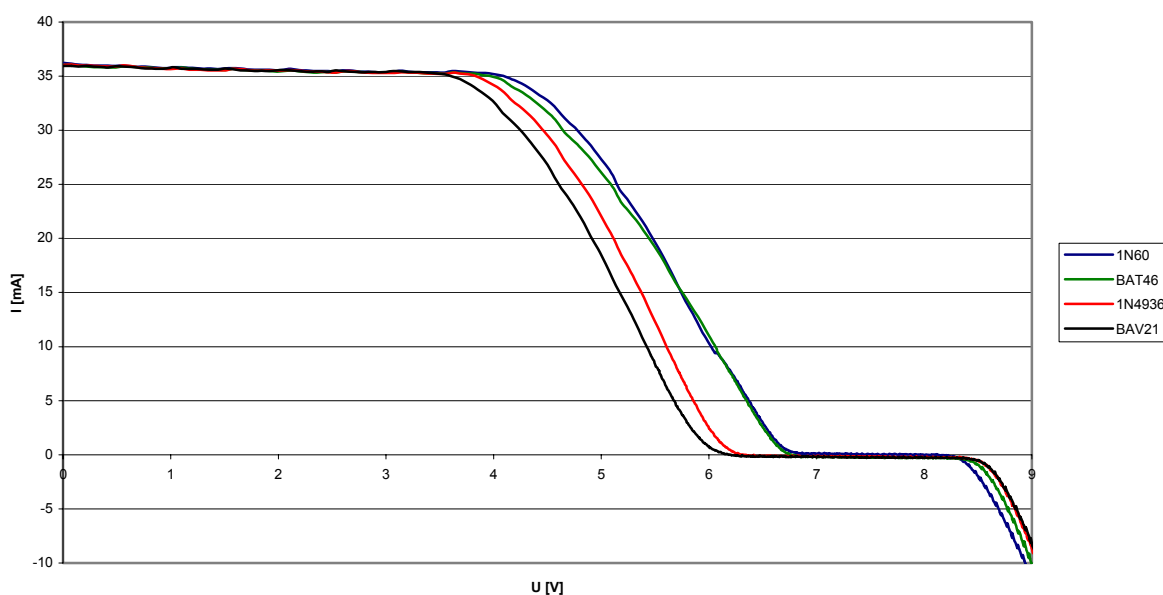


**Obrázek 11.13 : Průběhy při zastínění 1 článku pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

V následujícím měření byly zastíněny dva články. Články byly zastíněny ze 100 %. Oba zastíněné články měly vlastní přemostovací diodu. Výsledné napětí tedy kleslo o hodnotu napětí obou článků a úbytky napětí na diodách. Solární modul však dodává stejný proud. Účinnost poklesla zhruba o 3- 3,5%. Jako nejvýhodnější se jeví opět diody 1N60 a BAT46. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.8. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.14.

**Tabulka 11.8: Naměřené hodnoty při zastínění 2 článků**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	36,2	7,45	33,2	4,43	147,3	54,6	6,14
BAT46	25	36,0	6,79	33,1	4,33	143,2	58,6	5,97
1N4936	25	36,0	6,39	33,2	4,14	137,3	59,6	5,72
BAV21	25	35,9	6,194	33,0	3,96	130,4	58,6	5,43

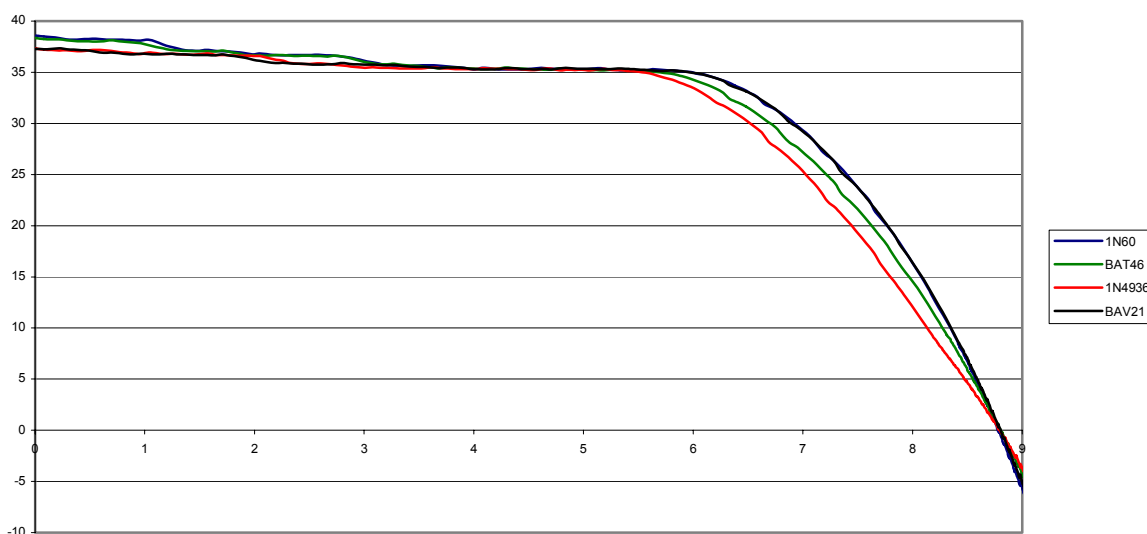


**Obrázek 11.14 : Průběhy při zastínění 2 článků pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

V další části měření bylo zkoumáno jaký vliv má přemostění diodou přes více solárních článků. V praxi totiž bývá někdy přemostěn větší počet článků pouze jednou diodou. Při následujícím měření byly přemostěny dva články při plném osvětlení. Opět jsou patrné proudové ztráty, které jsou však menší, protože byl použit menší počet diod. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.9. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.15.

**Tabulka 11.9 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 2 články a plném osvětlení**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	38,5	8,78	33,5	6,42	215,1	63,7	8,96
BAT46	25	38,3	8,80	33,2	6,23	206,9	61,3	8,62
1N4936	25	37,3	8,79	33,1	6,06	200,6	61,2	8,36
BAV21	25	37,3	8,80	33,5	6,41	214,8	65,4	8,95



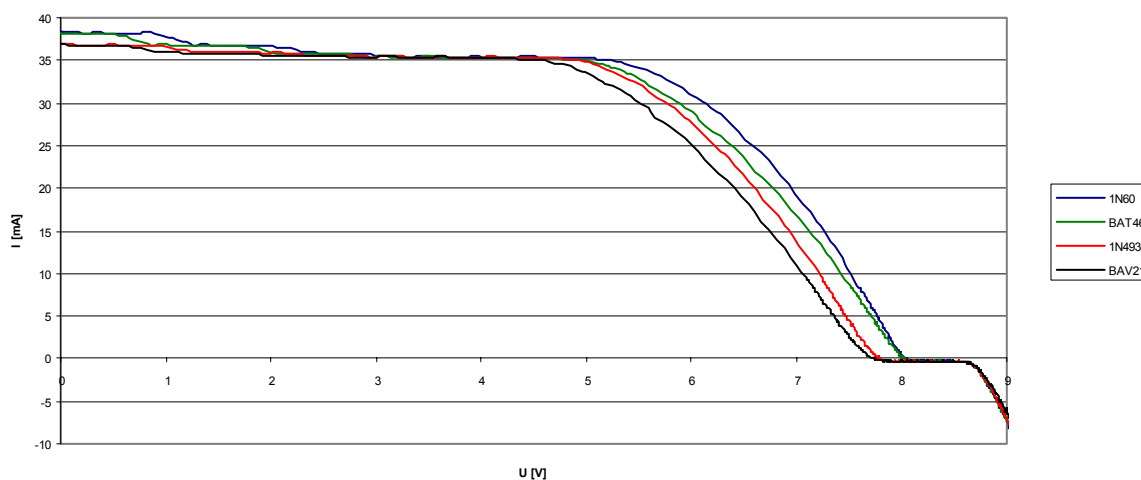
**Obrázek 11.15 : Průběhy při plném osvětlení a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

Při tomto měření byly přemostěny dva články, přičemž jeden z nich byl zastíněn. Zastíněním jednoho článku klesne výstupní napětí modulu o hodnotu napětí na článku a úbytek napětí na diodě. Proudové ztráty jsou v tomto případě nižší než při přemostění každého článku. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.10. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.16. Zde došlo k chybě při měření způsobené špatným propojením modulu, protože velikost úbytků nekoresponduje s teoretickými předpoklady. Připojením přemostovací diody přes dva články by mělo napětí poklesnout více, než je tomu v případě přemostění pouze jednoho článku. Pro ověření bylo provedeno další kontrolní měření viz obrázek. Kontrolní měření je uvedeno na konci práce viz obrázek 11.22 a tabulky 11.16 a 11.17.



**Tabulka 11.10 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 2 články**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	38,4	8,05	33,3	5,68	189,2	61,2	7,89
BAT46	25	38,2	8,04	32,9	5,47	180,3	58,7	7,51
1N4936	25	36,9	7,80	33,1	5,36	177,2	61,6	7,38
BAV21	25	36,8	7,75	32,6	5,16	168,1	58,9	7,00

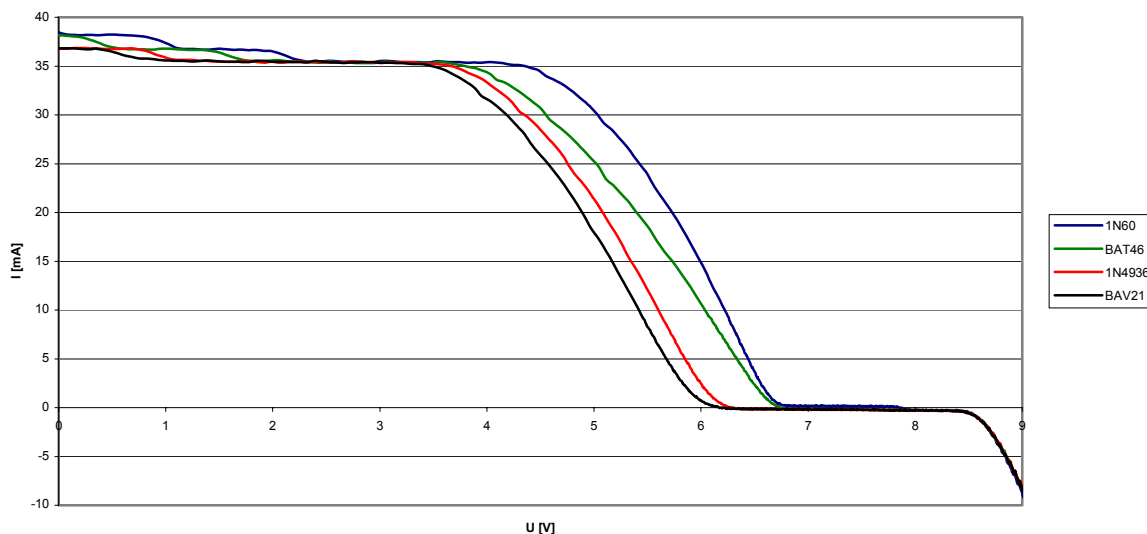


**Obrázek 11.16 : Průběhy při zastínění 1 článku a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

Při tomto měření byly přemostěny dva články a zastíněny dva články, každý zastíněný článek byl přemostěn jinou diodou. Výsledné napětí tedy kleslo o hodnotu napětí obou článků a úbytek napětí na diodě. Solární modul však dodává stejný proud. Účinnost poklesla zhruba o 3%. Jako nejvýhodnější se opět jeví diody 1N60 a BAT46. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.11. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.17.

**Tabulka 11.11 : Naměřené hodnoty při zastínění 2 článků a přemostění přes 2 články**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	38,4	7,86	33,3	4,68	155,9	51,6	6,49
BAT46	25	38,2	6,81	32,7	4,26	139,2	53,6	5,80
1N4936	25	36,8	6,35	32,7	4,07	133,3	57,0	5,55
BAV21	25	36,8	6,18	32,5	3,92	127,2	55,9	5,30

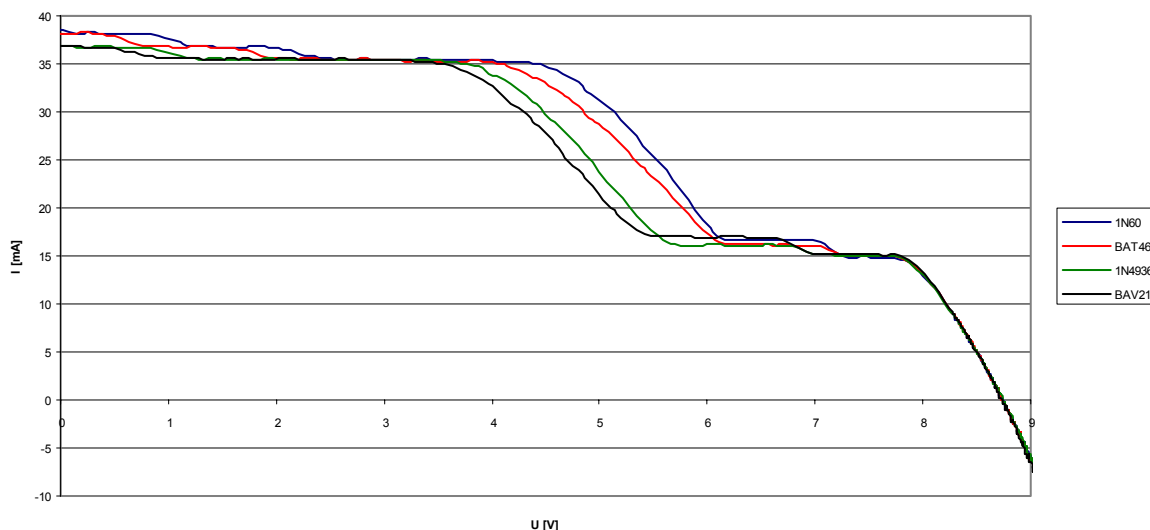


**Obrázek 11.17 : Průběhy při zastínění 2 článků a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

Při tomto měření byly přemostěny dva články a zastíněny dva články z 50 %, každý zastíněný článek byl přemostěn jinou diodou. Je patrné že částečně zastíněné články dávají zhruba poloviční proud. Napětí klesá o úbytky na diodách a o pokles napětí na obou člancích. Na charakteristice jsou patrné schodovité útvary odpovídající proudu dodávaném zastíněnými články. Jako nejvýhodnější se jeví diody 1N60 a BAT46. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.12. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.18.

**Tabulka 11.12 : Naměřené hodnoty při zastínění 2 článků z 50 % a přemostění přes 2 články**

Typ diody	T [°C]	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [V]	$I_m$ [mA]	$U_m$ [V]	$P_m$ [mW]	FF	$\eta$ [%]
1N60	25	38,5	8,74	33,3	4,75	158,4	47,1	6,60
BAT46	25	38,1	8,74	32,6	4,55	148,3	44,5	6,18
1N4936	25	36,8	8,75	32,8	4,19	137,3	42,6	5,72
BAV21	25	36,8	8,74	32,3	4,03	130,4	40,5	5,43

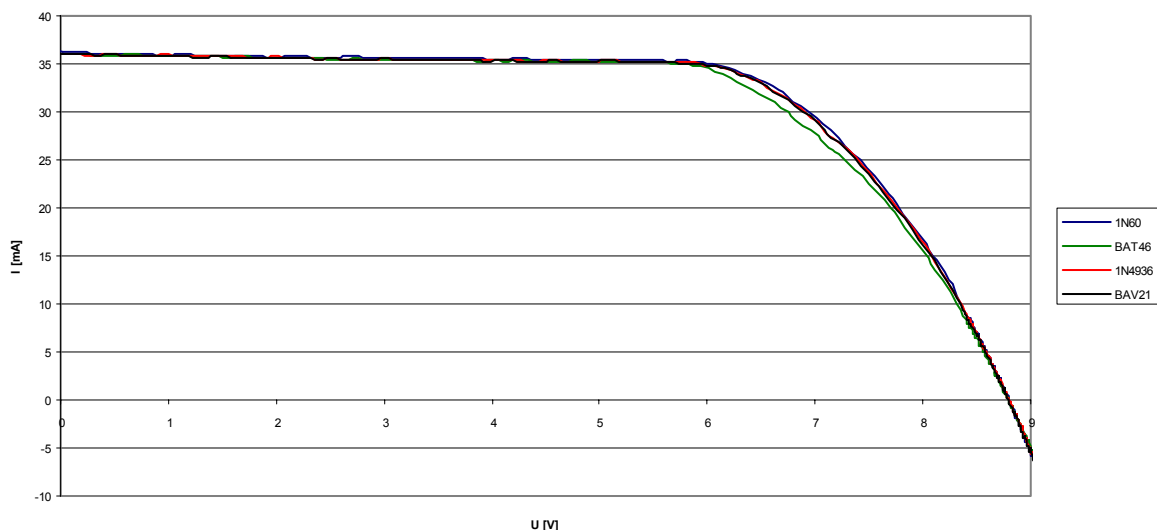


**Obrázek 11.18 : Průběhy při zastínění 2 článků z 50 % a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

V dalším měření byly přemostěny tři články při plném osvětlení. V tomto případě jsou proudové ztráty nejmenší. Při zastínění by však došlo ke značnému snížení účinnosti. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.13. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.19.

**Tabulka 11.13 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 3 články při plném osvětlení**

Typ diody	T [°C]	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [V]	$I_m$ [mA]	$U_m$ [V]	$P_m$ [mW]	FF	$\eta$ [%]
1N60	25	36,4	8,80	33,6	6,42	216,1	67,5	9,00
BAT46	25	36,0	8,79	33,3	6,27	208,4	65,8	8,68
1N4936	25	36,0	8,80	33,5	6,40	214,4	67,7	8,93
BAV21	25	36,0	8,79	33,4	6,40	214,1	67,6	8,92

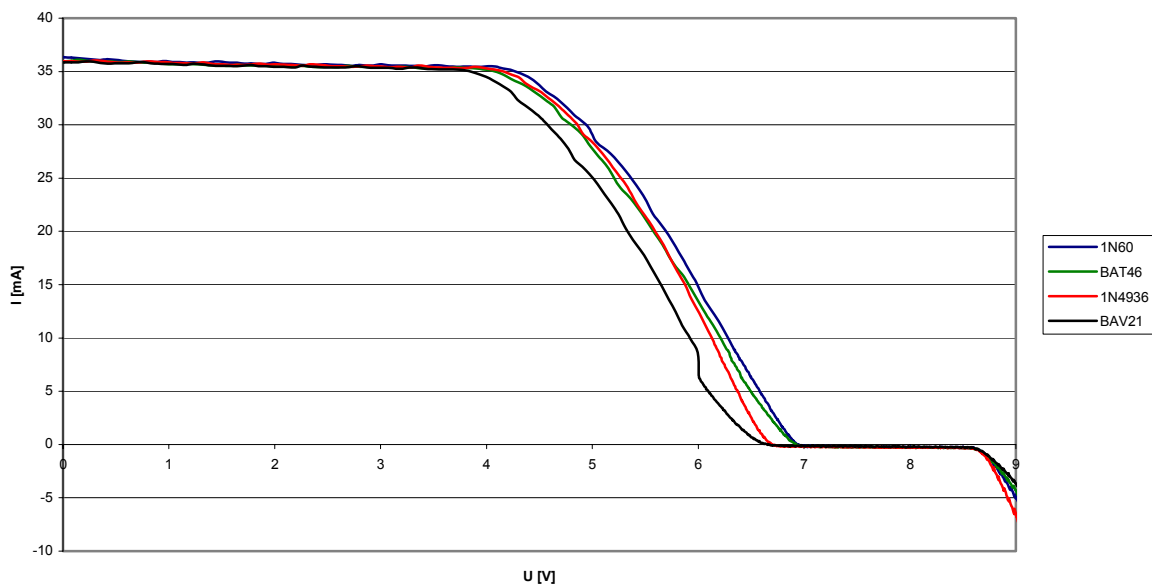


**Obrázek 11.19 : Přemostění přes 3 články při plném osvětlení pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

V dalším měření byly přemostěny tři články, přičemž jeden článek byl zastíněn. Zde je patrný značný úbytek napětí tvořený úbytkem napětí na diodě a poklesem o hodnotu napětí přemostěných článků. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.14. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.20.

**Tabulka 11.14 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 3 články při plném osvětlení**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	36,4	6,94	33,3	4,57	151,8	60,1	6,33
BAT46	25	36,0	6,93	32,9	4,48	147,2	59,0	6,14
1N4936	25	36,0	6,70	33,1	4,50	149,3	61,9	6,22
BAV21	25	35,9	6,66	32,7	4,27	139,7	58,5	5,82

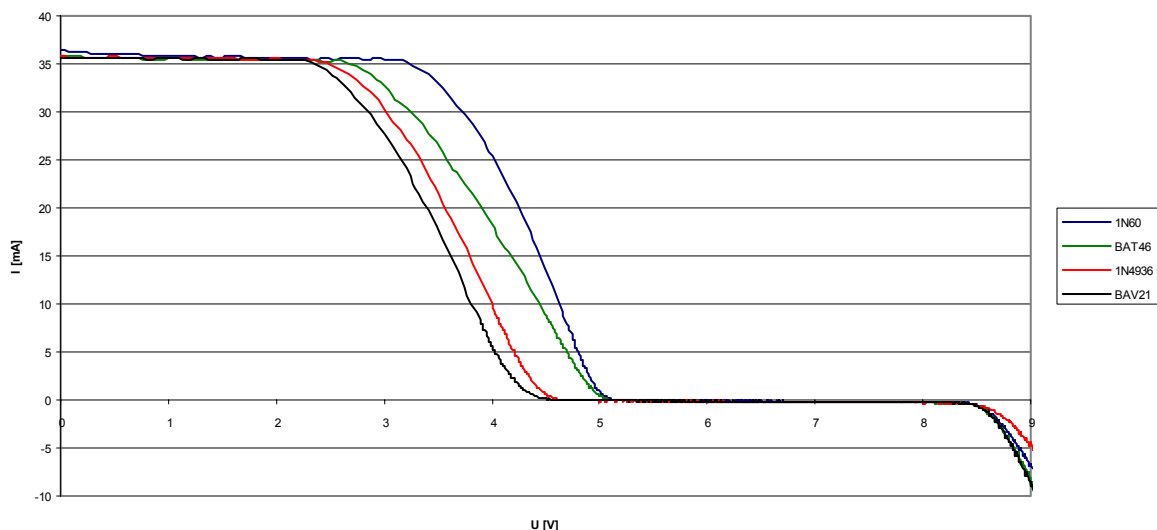


**Obrázek 11.20 : Přemostění přes 3 články při 1 zastíněném článku pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

V dalším měření byly přemostěny tři články, přičemž byly zastíněny dva články. V tomto případě napětí celého modulu kleslo zhruba na polovinu. Jako nejvýhodnější se opět jeví diody 1N60 a BAT46. Účinnost modulu poklesla o 3 – 4 %. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.15. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.21.

**Tabulka 11.15 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 3 články při plném osvětlení**

Typ diody	T [°C]	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [V]	$I_m$ [mA]	$U_m$ [V]	$P_m$ [mW]	FF	$\eta$ [%]
1N60	25	36,3	6,10	33,6	3,44	115,6	52,1	4,82
BAT46	25	35,8	5,11	32,1	3,06	98,3	53,8	4,10
1N4936	25	35,7	4,91	32,4	2,84	92,0	52,4	3,84
BAV21	25	35,7	4,94	32,0	2,70	86,4	49,0	3,60



**Obrázek 11.21 : Přemostění přes 3 články při 2 zastíněných člancích pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).**

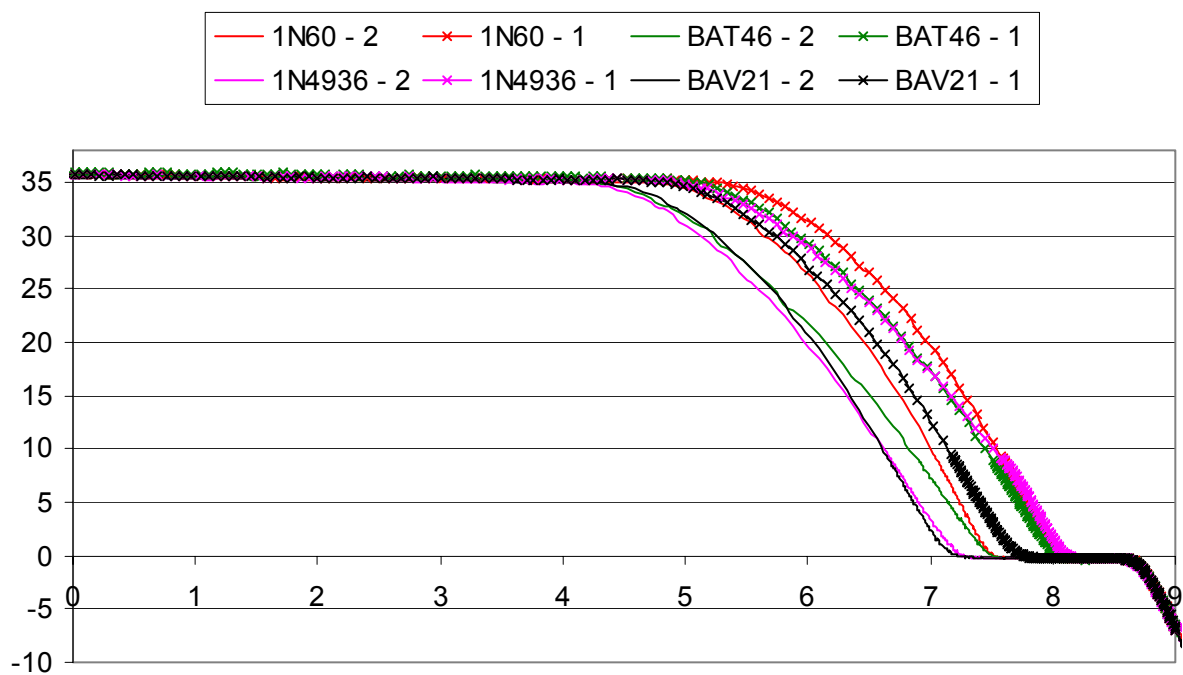
V následujících grafech je srovnáno přemostění přes jeden a dva články. Pro každý typ diody byl vytvořen jeden graf. Při tomto měření byl zastíněn první článek modulu. Byla použita pouze jedna dioda z každého typu. Podle teoretických předpokladů byl pokles napětí modulu nejnižší v případě přemostění jednoho článku. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.16 a 11.17. Grafické závislosti naměřených hodnot jsou vyneseny do grafu viz obrázek 11.22.

**Tabulka 11.16 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 1 článek**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	35,8	8,07	33,2	5,73	190,5	66,0	7,94
BAT46	25	35,9	8,04	33,2	5,50	182,8	63,3	7,62
1N4936	25	35,7	8,12	32,8	5,48	179,8	62,0	7,49
BAV21	25	35,7	7,76	33,0	5,33	176,0	63,5	7,33

**Tabulka 11.17 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 2 články**

Typ diody	T [°C]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [V]	I <sub>m</sub> [mA]	U <sub>m</sub> [V]	P <sub>m</sub> [mW]	FF	η [%]
1N60	25	35,5	7,52	33,1	5,28	174,5	65,3	7,27
BAT46	25	35,5	7,58	32,5	4,89	159,1	59,1	6,63
1N4936	25	35,5	7,35	32,4	4,81	156,1	59,8	6,51
BAV21	25	35,4	7,28	32,7	4,90	160,7	62,2	6,70



**Obrázek 11.22 : Srovnání výsledných charakteristik při přemostění přes jeden a dva články pro diody 1N60 (červená), BAT46 (zelená), 1N4936 (růžová) a BAV21(černá). Průběhy s křížkem odpovídají přemostění přes jeden článek.**

## 12 Závěr a zhodnocení

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit modul umožňující prostudování vlivu zastínění na celkové parametry. Jako základ tohoto modulu byl zvolen plošný spoj, na kterém bylo umístěno 16 solárních článků. Kontakty článků byly vyvedeny k okraji desky tak, aby umožnily realizaci propojení samotných článků a zároveň připojení přemostovacích diod. Byly zvoleny 4 různé druhy diod a u každého zvoleného typu bylo provedeno několik měření. Měření probíhalo na solárním simulátoru společnosti Solartec v Rožnově pod Radhoštěm. Přemostovací diody byly připojeny paralelně ke kontaktům měřených solárních článků prostřednictvím nepájivého kontaktního pole. Bylo potvrzeno, že zastínění pouze jediného solárního článku má značný vliv na celkové parametry solárního modulu. K částečné eliminaci toho nežádoucího efektu lze použít právě přemostovací diody. Výsledné naměřené hodnoty pro jednotlivá měření byly uvedeny v tabulkách a průběhy prezentovány pomocí grafických závislostí.

Bylo zjištěno, že při přemostění solárních článků dochází k určitým proudovým ztrátám. Při rozhodování o výběru přemostovacích diod je tedy žádoucí tyto ztráty zohlednit. Logicky čím méně přemostovacích diod bylo použito, tím menší byly i tyto ztráty. Celkové zastínění jednoho článku sníží celkový proud dodávaný modulem na zanedbatelnou hodnotu. Při přemostění zastíněného článku dojde ke snížení celkového napětí modulu o hodnotu napětí samotného článku a úbytek napětí na diodě. Při zastínění více článků se tento pokles dále zvyšuje. Ve všech případech se jako nejvýhodnější jeví použití germaniové diody 1N60 a Schottkyho diody BAT 46. Úbytky napětí byly v těchto případech nejnižší a docházelo k nejmenšímu snížení účinnosti. Při zastínění jednoho článku došlo ke snížení účinnosti o 1,5 až 2 % a při zastínění dvou článků o 3 až 3,5 %. Při přemostění více článků jednou diodou klesá výsledné napětí o hodnotu úbytků na diodě a napětí přemostěných článků. Ceny germaniových diod a Schottkyho diod jsou však několikanásobně vyšší než ceny univerzálních diod. Z tohoto důvodu může být v některých případech použití těchto diod nevýhodné. Je také důležité volit vhodné diody s ohledem na celkové parametry panelu. Je-li systémové napětí příliš vysoké, nelze germaniové diody a Schottkyho diody pro jejich limitující parametry použít. Diody 1N60 lze použít pouze do 50V a diody BAT46 do 100V. V návaznosti na tuto práci by mohl být další výzkum zaměřen na použití přemostovacích diod v provedení SMD.



## 13 Literatura

- [1] FEJFAR, Antonín. Fotovoltaické články pro výrobu sluneční energie. 2005 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.otevrena-veda.cz/ov/users/Image/default/C1Kurzy/Fyzika/10fejfar.pdf>>.
- [2] VANĚČEK, M.. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou [online]. 2000 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni\\_energie.php](http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni_energie.php)>.
- [3] Kazelle, J., Kaláb, P., Maxa, J., Sedlaříková, M., Vaněk, J., Zatloukal, M. Výrobní procesy. Skriptum VUT Brno. 2006.
- [4] Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování Solartec s.r.o.
- [5] Sluneční energetická s.r.o.. Výstavba fotovoltaických elektráren [online]. 2006 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.slen.cz/attachment/SLLEN%20rcn%20unor2006.pdf>>.
- [6] Vaněk, J., Křivák, P., Novák, V. Alternativní zdroje energie. Skriptum VUT Brno. 2006.
- [7] Czech RE Agency. Fotovoltaika pro každého [online]. 2007 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>>.
- [8] QUASCHNING, V., HANITSCH, R.. Influence of shading on electrical parameters of solar cells [online]. 1996 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW:  
<<http://ieeexplore.ieee.org/iel3/4263/12206/00564368.pdf>>.
- [9] LIBRA, M., POULEK, V.. Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny energie [online]. 2005 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>>.
- [10] Polovodičové diody [online]. 2002 [cit. 2008-05-30]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.sweb.cz/jjohnyk/elektronika/elnik.pdf>>.

## Seznam tabulek

Tabulka 11.1 : Parametry 1 solárního článku Stefan.....	29
Tabulka 11.2: Parametry 1N60 .....	30
Tabulka 11.3: Parametry BAT46 .....	30
Tabulka 11.4: Parametry BAV21 .....	31
Tabulka 11.5: Parametry 1N4936 .....	31
Tabulka 11.6: Naměřené hodnoty bez zastínění .....	37
Tabulka 11.7 : Naměřené hodnoty při zastínění 1 článku .....	38
Tabulka 11.8: Naměřené hodnoty při zastínění 2 článků .....	39
Tabulka 11.9 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 2 články a plném osvětlení.....	40
Tabulka 11.10 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 2 články.....	41
Tabulka 11.11 : Naměřené hodnoty při zastínění 2 článků a přemostění přes 2 články.....	41
Tabulka 11.12 : Naměřené hodnoty při zastínění 2 článků z 50 % a přemostění přes 2 články.....	42
Tabulka 11.13 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 3 články při plném osvětlení .....	43
Tabulka 11.14 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 3 články při plném osvětlení .....	44
Tabulka 11.15 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 3 články při plném osvětlení .....	45
Tabulka 11.16 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 1 článek .....	46
Tabulka 11.17 : Naměřené hodnoty při přemostění zastíněného článku přes 2 články.....	46

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Předpokládaný růst fotovoltaiky [4] .....	9
Obrázek 3.1: Mapa globálního slunečního záření ČR (MJ/m <sup>2</sup> za rok).....	10
Obrázek 4.1 :Model elektronů a děr vlastního polovodiče [9] .....	12
Obrázek 4.2 : Model elektronů a děr u polovodiče typu N [9].....	13
Obrázek 4.3 : Model přechodu PN [9] .....	15
Obrázek 5.1: Řez solárním článkem [6].....	17
Obrázek 6.1 : Spektrum slunečního záření a absorpční hrana křemíku [2].....	18
Obrázek 7.1: Celkové ztráty solárního článku [6].....	19
Obrázek 7.2: Konstrukce článku s rovinným povrchem [7].....	19
Obrázek 7.3 : Struktura PERL [2].....	20
Obrázek 7.4 : Článek s kontakty vytvořenými sítotiskovou metodou [2] .....	20
Obrázek 7.5: Tandemový solární článek [2] .....	23
Obrázek 8.1: Struktura solárního panelu [4] .....	24
Obrázek 8.2: Základní druhy solárních modulů [4] .....	25
Obrázek 9.1: Voltampérová charakteristika solárního článku v při různém zastínění [8].....	26
Obrázek 9.2: Použití přemost'ovacích diod .....	27
Obrázek 11.1: Předloha pro plošný spoj .....	30
Obrázek 11.2: Germaniová dioda 1N60.....	30
Obrázek 11.3: Schottkyho dioda BAT46 .....	31
Obrázek 11.4: Univerzální dioda BAV21 .....	31
Obrázek 11.5: Univerzální dioda 1N4936.....	32
Obrázek 11.6: Hotový model pro měření .....	32
Obrázek 11.7: Korekce naměřených hodnot .....	33
Obrázek 11.8: Nastavení rozsahů.....	35
Obrázek 11.9: Parametry solárních článků .....	35
Obrázek 11.10 Průběhy bez připojených přemost'ovacích diod při plném osvětlení (modrá), při zastínění 1 článku(zelená) a při zastínění 2 článků (červená).....	36
Obrázek 11.11 : Připojení diod prostřednictvím nepájivého pole .....	36
Obrázek 11.12 : Průběhy s připojenými přemost'ovacími diodami při plném osvětlení 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	37
Obrázek 11.13 : Průběhy při zastínění 1 článku pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá) .....	38
Obrázek 11.14 : Průběhy při zastínění 2 článků pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá) .....	39

Obrázek 11.15 : Průběhy při plném osvětlení a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	40
Obrázek 11.16 : Průběhy při zastínění 1 článku a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	41
Obrázek 11.17 : Průběhy při zastínění 2 článků a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	42
Obrázek 11.18 : Průběhy při zastínění 2 článků z 50 % a přemostění přes 2 články pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	43
Obrázek 11.19 : Přemostění přes 3 články při plném osvětlení pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	44
Obrázek 11.20 : Přemostění přes 3 články při 1 zastíněném článku pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	45
Obrázek 11.21 : Přemostění přes 3 články při 2 zastíněných člancích pro diody 1N60 (modrá), BAT46 (zelená), 1N4936 (červená) a BAV21 (černá).....	46
Obrázek 11.22 : Srovnání výsledných charakteristik při přemostění přes jeden a dva články pro diody 1N60 (červená), BAT46 (zelená), 1N4936 (růžová) a BAV21(černá). Průběhy s křížkem odpovídají přemostění přes jeden článek. ....	47